贵州省黎平县地表覆被变化引起的生态系统碳储量变化

李义平[1], 蔡 宏[1], 田鹏举[2], 张蓓蓓[1], 廖书冰[1]

(1. 贵州大学 矿业学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 贵州省生态气象和遥感中心, 贵州 贵阳 550002)

摘 要: [目的] 对贵州省黎平县地表覆被变化引起的生态系统碳储量变化进行评估,为区域碳源和碳汇管理及"大生态"发展目标提供科学依据。[方法] 基于黎平县 2005,2010 和 2015 年 3 期土地利用数据,结合 CA-Markov 模型和 InVEST 模型碳储量模块,在对土地利用变化趋势进行分析的基础上定量评估了研究区 2005—2025 年生态系统固碳能力。[结果] ①2005—2015 年,黎平县耕地、林地、未利用地呈减少趋势,草地、建设用地、水域呈增加趋势。②2015—2025 年土地利用整体变化趋势与 2005—2015 年一致但幅度增大。耕地由 2005—2015 年的降幅 2.37% 到 2015—2025 年的增幅 4.21%,整体趋势发生转变;③2015 年黎平县生态系统总碳储量和平均碳密度分别为 9.12×10^7 t 和 206.61 t/hm^2。自 2005 年以来分别下降 2.00×10^5 t 和 0.45 t/hm^2。2025 年黎平县碳储量和平均碳密度分别为 8.98×10^7 t 和 203.44 t/hm^2。[结论] 黎平县生态系统固碳能力呈减弱趋势,林地的大面积转出和建设用地的扩张是碳储量下降的直接原因,未来应加强对土地利用结构的优化。

关键词: 碳储量; 碳密度确定; 地表覆被; CA-Markov 模型; InVEST 模型

文献标识码: A **文章编号**: 1000-288X(2020)02-0092-08 **中图分类号**: F301.2

文献参数: 李义平, 蔡宏, 田鹏举, 等. 贵州省黎平县地表覆被变化引起的生态系统碳储量变化[J]. 水土保持通报, 2020, 40(2): 92-99. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2020.02.013; Li Yiping, Cai Hong, Tian Pengju, et al. Changes in ecosystem carbon stock caused by land cover conversion in Liping County of Guizhoui Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(2): 92-99.

Changes in Ecosystem Carbon Stock Caused by Land Cover Conversion in Liping County of Guizhoui Province

Li Yiping[1], Cai Hong[1], Tian Pengju[2], Zhang Beibei[1], Liao Shubing[1]

(1. *Mining College of Guizhou University, Guiyang, Guizhou* 550025, *China*;
2. *Guizhou Ecological Meteorology and Satallite Remote Sensing Center, Guiyang, Guizhou* 550002, *China*)

Abstract: [Objective] The change of ecosystem carbon stock caused by the change of surface cover in Liping County, Guizhou Province was evaluated, in order to provide scientific basis for the management of regional carbon source and sink, and the development goal of "large ecology". [Methods] Based on the land use data of 2005, 2010 and 2015, the carbon sequestration capacity of the ecosystem of Liping County from 2005 to 2025 was quantitatively evaluated by combined the CA-Markov model with the InVEST carbon storage module. [Results] ① From 2005 to 2015, the cultivated land, forest land and unused land in Liping County decreased, while the grassland, construction land and water area increased generally. ② And the overall variation of land use change in 2015—2025 was consistent with that in 2005—2015. The cultivated land decreased from 2.37% in 2005—2015 to 4.21% in 2015—2025. ③ The total carbon stock and average carbon density of Liping County ecosystem were 9.12×10^7 t and 206.61 t/hm^2, respectively in 2015, which has decreased by 2.00×10^5 t and 0.45 t/hm^2 since 2005. In 2025, the carbon storage and average carbon density

收稿日期: 2019-10-14 **修回日期**: 2019-12-12

资助项目: 贵州省生态学一流学科建设项目"利用遥感技术对贵州省植被时空变化及其与气候变化响应研究"(GNYL[2017]007); 贵州省科技计划项目"基于遥感和 GIS 的喀斯特流域坡地景观演化水质响应机制研究"(黔科合基础[2016]1028)

第一作者: 李义平(1994—),男(汉族),四川省内江市人,硕士研究生,主要研究方向为资源环境遥感。Email: 635606838@qq.com。

通讯作者: 蔡宏(1980—),女(汉族),甘肃省金昌市人,博士,副教授,主要从事资源环境遥感方面的研究。Email: 588cai@163.com。

of Liping County was predicted to be 8.98×10^7 t and 203.44 t/hm^2, respectively. [Conclusion] The carbon sequestration capacity of the ecological system in Liping County is weakening. The transfer of forest in large scale and the expansion of construction land are the direct reasons for the decline of carbon storage. In the future, the optimization of land use structure should be strengthened.

Keywords: carbon storage; determination of carbon density; ground cover; CA-Markov model; InVEST model

在全球碳循环中,陆地生态系统通过地表植被、土壤固定大气中的CO_2,从而将化学元素碳有效的固定下来,被认为是全球最大的碳库[1]。土地利用变化会改变地表覆被情况,对区域植被、土壤的固碳能力产生重要影响,进而影响陆地生态系统各部分碳的分配[2]。因此,开展地表覆被变化对陆地生态系统碳储量影响的研究有助于探寻土地利用结构优化途径以提高区域生态系统碳储量,对于改善自然生态系统有着重要的积极意义。近年来,国内外研究学者分别采用不同碳储量估算方法,基于不同尺度视角对简单或复杂生态系统的碳储量进行了估算[3-5],并探讨了不同地表覆被类型与碳储量之间的响应关系[6-7]。研究[8-9]发现,热带雨林大面积森林乱砍乱伐被认为是全球范围内陆地生态系统碳储量损失的主要原因,而基于城市和国家视角,陆地生态系统碳储量受到城市扩张所带来的林地、耕地向建设用地的转换以及国家退耕还林还草政策实施的双重影响[10-12]。还有学者通过不同土地利用预测模型结合人文、经济、地理等相关因素模拟了未来流域生态系统和国家生态系统的碳储量发展趋势[13-14],探讨了如何优化土地利用格局才能满足低碳经济发展的需要[15]。然而,当前的研究多集中在城市、流域生态系统等大区域范围内的碳储量估算及其变化趋势,而结合时间空间尺度对小区域地表覆被变化所引起的碳源、碳汇转化研究相对较少,也没有对未来县域尺度地表覆被转移趋势对生态系统碳储量变化影响研究开展深入探讨。县作为国家基本行政区划之一,是城市生态系统的重要组成部分,开展县域尺度生态系统潜在碳储量评估能够为低碳视角下城镇化建设管理及决策提供一定科学依据,有助于实现县域生态系统低碳经济和生态环境的可持续发展。InVEST(integrated valuation of ecosystem services and trade-offs)模型能够实现生态系统服务功能的可视化表达,该模型的碳储量模块以土地利用数据为基础,结合碳密度数据定量评估生态系统碳储量[16],具有输入数据简单、数据获得性强、可视化表达和免费开源等优点,在许多地区得到成功应用。

贵州省黎平县作为国家 28 个重点林区县之一,生态环境条件优越。自 20 世纪以来,由于经济的快速发展、城镇化进程的加快,黎平县土地利用和地表覆被发生了明显变化,陆地生态系统碳储量受到一定影响。因此,开展黎平县生态系统固碳能力的研究显得尤为重要。本文以黎平县为研究区,利用 InVEST 模型定量研究黎平县 2005—2015 年碳储量时空分布及变化情况,并结合 CA-Markov 模型模拟 2025 年地表覆被情况,对黎平县生态系统碳储量进行预测,定量评估黎平县生态系统的固碳能力,旨在为重点林区县的生态系统碳储量管理和“大生态”发展提供有效支持。

1　研究区与研究方法

1.1　研究区概况

黎平县位于贵州省东南部,地理位置为东经 108°37′—109°31′,北纬 25°43′—26°31′,属黔东南苗族侗族自治州,是贵州省与湖南、广西的交界县。该县总面积 4 439 km^2,是黔东南面积最大、中国侗族人口最多的县,地处高海拔低纬度区域,境内地形复杂多样,海拔相对高差 1 436 m,地势起伏显著,是素有“九山半水半分田”之称的典型山区县。研究区属于亚热带季风性湿润气候,生态环境优美,土壤肥沃,气候温暖,适合各种动植物生长,是中国南方植物基因库。主要地表覆被类型为林地,森林资源丰富,2006 年该县活立木蓄积量 1.42×10^7 m^3,位居贵州省 10 个林业县之首,且植被类型众多,其中地带性植被为常绿阔叶林。土壤类型主要包括黄壤、红壤、石灰土和水稻土。

1.2　数据来源

2005,2010,2015 年的黎平县土地利用数据以 Landsat TM 和 Landsat OLI 遥感影像为数据源,影像数据源来自地理空间数据云平台(http://www.gscloud.cn),利用 ENVI 5.3 软件进行人机交互解译获得,并参考中国土地资源分类系统,将研究区土地利用分为耕地、林地、草地、水域、建设用地以及未利用地六大类,经精度评价 Kappa 系数分别为 78.32%,80.28%和 81.45%。DEM 数字高程数据来自地理空间数据云,并在 ArcGIS 中生成坡度、坡向数据,空间分辨率为 30 m。温度、降水数据来自贵州省气象局,利用气象站点数据通过反距离加权法空间插值而成,空间分辨率为 30 m。

1.3　研究方法

1.3.1　基于 CA-Markov 模型的土地利用预测　元胞自动机(CA)模型是一种没有固定数学公式但空

间、时间、状态呈现离散型的网格动力学模型，其在时间因果关系和空间相互作用上均为局部关系。该模型所输入的每个变量将状态控制在某一个数量范围内，其状态(例如某一个栅格的具体属性)根据其前一个状态和周边栅格属性按照某一规律变化进行自主分析，能够对时间、空间相对复杂的系统环境进行预测[17]。马尔科夫(Markov)模型是一种可以对无明显规律变化进行状态分析的随机模型，它记载并统计每个栅格地类已知两个时段内的变化情况并生成转换概率矩阵，用于预测目标年份的地表覆被情况[18]。两种模型各有优势，马尔科夫模型更加侧重于对地表覆被变化数量的预测，可进行长时间序列预测，但缺乏空间表达能力，无法展现各类型土地的空间分布。而元胞自动机的转换规则不仅依赖于前一个状态，而且取决于其周边领域的状态，能够对复杂空间系统的时空动态演化过程进行表达。CA-Markov 模型综合了二者在模拟复杂环境上的优点，能够精准的从空间状态分布和栅格数量方面对地表覆被变化的时空格局进行建模。具体操作步骤为：①建立转换规则。根据研究区 2005 和 2010 年土地利用数据，在 IDRISI Selva 平台下运用 Markov 模型记录 2005—2010 年所有栅格的转换状态，并生成概率转移矩阵作为转换规则参与 2015 年土地利用模拟。②建立适宜性图集。适宜性能够充分描述当前每个土地利用栅格在未来状态的适宜性程度，通过集合所有地类适宜性图来建立下一状态土地利用适宜性图集。基于 2005 年的土地利用状况，将土地利用作为因变量，温度、降水、高程、坡度、坡向作为驱动因子，利用 IDRISI 平台的空间多元回归模型(LogisticReg 模块)进行回归分析，计算得到所有土地类别的空间概率分布图，再使用 collection editor 模块将所有的空间概率分布图集成在一个文件中。③迭代次数及领域滤波器的选择。根据前人研究成果[19]，选择 5×5 摩尔领域作为滤波参数，迭代次数选择 10。④精度检验。首先利用 ROC 曲线对每个土地利用类型涉及的 5 个驱动因素所产生的 Logistic 回归结果进行精度检验，通过对不同判定标准下的同一信号源进行刺激反应，其值大于 0.7 说明本文所选驱动因子均通过一致性检验且对该土地利用类型具有较强的解释能力[20]；然后，采用误差精度和 kappa 系数对研究区 2015 年土地利用模拟结果和 2015 年土地利用解译数据进行真实性检验。⑤2025年土地利用模拟。如果 2015 年土地利用模拟数据的 Kappa 系数大于 0.75，说明 CA-Markov 模型及所选驱动因子能够较好地模拟研究区土地利用格局。重复上述主要步骤，建立 2015 年适宜性图集与 2005—2015 年转换规则，以 2015 年土地利用现状图为基础模拟 2025 年研究区土地利用格局。

1.3.2 基于 InVEST 模型的碳储量评估

(1) InVEST 模型简介。InVEST 模型是一种探索人类决策对生态服务系统影响的可视化工具，其海洋水质、栖息地风险评估、碳储存和固定等多个模块可对生态系统服务和交易具有操作简便、输入数据易获取等优点。该模型把陆地生态系统碳分为 4 个部分，分别是地上碳、地下碳、土壤碳和死亡有机碳，其中地下碳是指植物在土壤中的根系部分所储存的有机碳，死亡有机碳是指死亡凋落物和枯落物所储存的有机碳，但由于死亡有机碳的数据相对复杂且不易观测获取，固在本研究当中仅仅考虑地上、地下和土壤中所储存的碳。具体计算公式为：

$$C_i = C_{i\text{-above}} + C_{i\text{-beiow}} + C_{i\text{-soil}} \quad (1)$$

$$C_{\text{tot}} = \sum_{i=1} C_i \cdot S_i \quad (2)$$

式中：i 为土地利用类型；C_{tot} 为生态系统总碳储量(t)；$C_{i\text{-above}}$ 为 i 类土地利用类型的地上碳密度(t/hm^2)；$C_{i\text{-below}}$ 为 i 类土地利用类型的地下碳密(t/hm^2)；$C_{i\text{-soil}}$ 为 i 类土地利用类型的土壤碳密度(t/hm^2)；S_i 为 i 类土地利用类型的面积；n 为土地利用类型的数量。

(2) 碳密度数据的选定。研究区实测碳密度数据能够有效提高碳储量估算精度，但目前研究区基于土地利用类型的实测碳密度数据较为缺乏，因此相关碳密度值的确定工作由两部分组成：①收集研究区及周边领域的实测碳密度数据；②查找相似区域和全国尺度碳密度数据并利用温度、降水校正模型进行修正。基于此，研究区不同土地利用碳密度数据如表 1 所示。

表 1 研究区不同土地利用碳密度数据 t/hm^2

土地利用类型	地上生物量碳密度	地下生物量碳密度	土壤碳密度
耕 地	38.90	7.30	89.18
林 地	45.08	18.03	171.84
草 地	3.60	24.40	129.60
水 域	0	0	0
建设用地	0	0	110.69
未利用地	0.59	0.64	164.93

表 1 中，林地地上碳密度数据来源于李默然[21]等人对黔东南主要森林类型碳储量研究的实测数据并取平均值；根据李克让[22]、方精云[23]等相关研究成果，获得全国水平的耕地、草地地上碳密度，并采用 Alam[24]等、Giardina[25]等、陈光水[26]等关于碳密度与气温和降水的关系模型，将全国尺度碳密度数据修

正得到研究区碳密度数据;未利用地、建设用地碳密度数据根据张峰[27]、朱超[28]等研究成果并进行修正得到;地下碳密度数据根据黄玫[29]、朴世龙[30]、方精云[31]等对不同土地利用类型地上地下生物量比值的研究成果进行运算得出,耕地地下地上生物量比值取 0.19,草地地下地上生物量比值取 4.1,林地地下地上生物量比值取 0.4;建设用地、水体的地上、地下碳密度均默认为 0;各土地利用类型的土壤碳密度数据根据帅虎[32]等人对重庆市碳储量的研究成果进行修正得到。具体修正公式为:

$$C_{SP}=3.396\ 8MAP+3\ 996.1 \quad (3)$$

$$C_{SP}=6.798e^{0.005MAP} \quad (4)$$

$$C_{BT}=28MAT+398 \quad (5)$$

式中:C_{SP}为根据年降水量得到的土壤碳密度; C_{BP},C_{BT}为根据年降水量和年均温度得到的地上生物量碳密度; MAP 为年降水量; MAT 为年平均温度。将 2005 年全国和黎平县的年均降水量及温度(697.25 mm/9 ℃,1 028.13 mm/15.6 ℃)分别带入上述公式,二者之比即为修正系数。

2　结果分析

2.1　黎平县 2005—2015 年土地利用特征

黎平县主要土地利用类型为林地,其面积占黎平县总面积的 1/2 以上。由表 2 可知,2005 年林地、耕地、草地面积占研究区比例分别为 69.11%,16.61% 和 13.85%,其次为建设用地和水域,分别为 0.26%和 0.12%,未利用地占比极少,仅有 0.04%。在 2005—2015 年,草地、建设用地、水域面积呈增加趋势,分别增加 2 942.19,933.75 和 86.49 hm^2,较 2005 年研究区比例分别增加 0.67%,0.22%和0.02%,其中建设用地和水域的扩张最为明显,增幅分别为 79.955%,15.827%;耕地、林地、未利用地面积呈减少趋势,分别减少 1 736.01,2 120.22 和 106.2 hm^2,其中未利用地降幅最大,降幅为 57.34%。

表 2　研究区 2005—2015 年土地利用面积变化

土地利用类型	2005 年		2015 年		变化量	
	面积/hm^2	比例/%	面积/hm^2	比例/%	面积/hm^2	幅度/%
耕 地	73 296.72	16.61	71 560.71	16.21	−1 736.01	−2.368
林 地	305 066.79	69.11	302 946.57	68.63	−2 120.22	−0.695
草 地	61 146.99	13.85	64 089.18	14.52	2 942.19	4.812
水 域	546.48	0.12	632.97	0.14	86.49	15.827
建设用地	1 167.84	0.26	2 101.59	0.48	933.75	79.955
未利用地	185.22	0.04	79.02	0.02	−106.2	−57.34

2005—2015 年黎平县土地利用类型发生改变的面积为 10 866.51 hm^2,在土地面积恒定的情况下各主要土地利用类型之间均发生了相互的转入与转出(表 3)。其中,行为转出,列为转入,耕地—耕地、草地—草地、林地—林地、水域—水域、建设用地—建设用地、未利用地—未利用地表示该地类在时空格局上未发生改变的面积。

10 a 间,林地是其他土地利用类型的主要贡献者,其转出面积大约是转入面积的 1.5 倍,主要转为草地(3 844.26 hm^2),占转出面积的67.45%。耕地的转出面积大约为转入面积的 2 倍,其面积主要流向于林地(2 605.68 hm^2)和建设用地(523.89 hm^2),分别占转出面积的 73.43%,14.76%。建设用地转入面积的主要来源为耕地(523.89 hm^2),其次为林地(256.86 hm^2)和草地(166.05 hm^2),分别占转入面积的 55.07%,27%,17.46%。未利用地虽然面积较少,但有 73.42%的面积转换为林地。综合分析可知,2005—2015 年黎平县土地利用类型之间的主要变化趋势为:部分林地转为草地;建设用地的扩张占用的大面积的耕地、林地和草地。

表 3　研究区 2005—2015 年土地利用面积转移矩阵　　hm^2

土地利用类型	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	总计
耕 地	69 748.20	2 605.68	372.15	42.57	523.89	4.23	73 296.72
林 地	1 502.01	299 367.18	3 844.26	38.16	256.86	58.32	305 066.79
草 地	292.95	936.63	59 734.26	14.58	166.05	2.52	61 146.99
水 域	3.42	4.41	1.08	533.97	1.08	2.52	546.48
建设用地	8.10	4.14	1.44	1.89	1 150.38	1.89	1 167.84
未利用地	6.03	28.53	135.99	1.8	3.33	9.54	185.22
总 计	71 560.71	302 946.57	64 089.18	632.97	2 101.59	79.02	441 410.04

2.2 CA-Markov 模型精度检验与预测结果

首先运用 ROC 曲线对 Logistic 回归模型结果进行检验(表 4)。结果表明,2005 年耕地、林地、草地、水体、建设用地、未利用地的 ROC 值依次为 0.851 1,0.897 8,0.783 2,0.935 1,0.914 2 和 0.968 4,均大于 0.7,说明本文所选因子符合研究区实际情况。然后,分别从数量和空间分布角度进行精度评价。在数量方面,将模拟土地利用面积与真实土地利用面积进行误差精度计算(表 5),研究区主要土地利用类型的误差精度均小于 10%,表明该模型在数量上的预测精度较高。在空间分布方面,利用 IDRISI 平台中的 Crosstab 模块进行 kappa 系数检验可知,kappa 系数为 0.879,表明该模型模拟的 2015 年土地利用格局与实际现状比较接近,具有良好的预测能力,可用于 2025 年的土地利用模拟。最后,同样采用 ROC 曲线对 2015 年适宜性图集进行回归检验,各个地类 ROC 值均满足研究需要。

表 4 研究区 2005 和 2015 年不同土地利用类型 Logistic 回归结果

编码	耕地		林地		草地		水体		建设用地		未利用地	
	2005 年	2015 年	2005 年	2015 年	2005 年	2015 年	2005 年	2015 年	2005 年	2015 年	2005 年	2015 年
常量	8.691 8	−4.064 0	−8.660 2	−1.339 3	−8.957 7	1.674 4	−37.828 0	23.261 0	−46.131 0	15.321 0	−11.657	5.946 5
A	−0.003 5	−0.003 1	0.002 5	0.002 1	0.000 1	−0.000 1	−0.012 3	−0.011 9	−0.006 9	−0.005 9	0.010 5	0.003 1
B	−0.008 0	0.000 6	0.004 0	0.000 5	0.006 8	−0.005 6	0.025 6	−0.015 3	0.029 9	−0.041 3	−0.019 0	−0.026 1
C	−0.023 7	−0.019 5	0.018 0	0.016 7	−0.002 6	−0.006 4	−0.023 7	−0.019 7	−0.080 8	−0.075 9	−0.012 0	−0.000 2
D	0.001 4	0.001 2	−0.000 5	−0.000 5	−0.000 6	−0.000 5	0.000 5	0.000 1	0.002 2	0.002 2	0.000 6	0.000 3
E	0.036 1	0.212 3	0.198 1	−0.017 5	0.004 0	0.326 0	0.630 4	0.056 0	0.766 6	2.780 5	0.754 8	1.367 2
ROC	0.851 1	0.834 8	0.897 8	0.892 3	0.783 2	0.763 4	0.935 1	0.936 7	0.914 2	0.909 2	0.968 4	0.860 6

注:A—E 依次为高程、降水、坡度、坡向和温度。

表 5 研究区 2015 年土地利用模拟数量精度验证

土地利用类型	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
模拟栅格数	855 490	3 236 797	777 625	8 106	25 754	784
实际栅格数	795 119	3 366 073	712 102	7 033	23 351	878
误差绝对值/%	7.59	3.96	9.20	15.26	10.29	10.71

由预测结果可知(见封 3 附图 2—3),2025 年黎平县耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地面积分别为 74 575.71,286 127.19,77 084.73,983.16,2 556.09和 83.16 hm^2。2015—2025 年土地利用类型的变化趋势与 2005—2015 年基本相同,草地、建设用地和水域面积依旧保持增长趋势,林地面积持续减少但幅度增大,唯一不同的是耕地由 2005—2015 年的小幅减少变为 2015—2025 年的小幅增加,未利用地变化较小。与 2015 年相比,面积增加最多的土地利用类型为草地(12 995.55 hm^2),占研究区面积的 2.94%,其次为耕地(3 015 hm^2)、建设用地(454.5 hm^2)和水域(350.19 hm^2);林地依旧保持减少趋势,共减少 16 819.38 hm^2,占研究区面积的 3.81%,仍旧是其它土地利用类型的主要贡献者。2015—2025 年草地、水体的增幅分别为 20.28% 和 55.33%,较 2005—2015 年增加幅度更为明显;2015—2025 年建设用地增幅为 21.63%,较 2005—2015 年增加幅度有所减缓;2015—2025 年林地减少幅度为 5.55%,较 2005—2015 年减少幅度更加明显;而耕地由 2005—2015 年的降幅 2.37%到 2015—2025 年的增幅4.21%,整体趋势发生转变。

2.3 生态系统碳储量变化分析

由图 1—2 可以看出,黎平县 2005 和 2015 年生态系统总碳储量分别为 9.14×10^7 t 和 9.12×10^7 t,平均碳密度分别为 207.06 和 206.61 t/hm^2,2005—2015 年碳储量和碳密度分别减少了 2.00×10^5 t 和 0.45 t/hm^2,林地的大面积转出以及建设用地的扩张是碳密度和碳储量下降的直接原因。由预测结果可知,2025 年生态系统碳储量和平均碳密度分别为 8.98×10^7 t 和 203.44 t/hm^2,2015—2025 年碳储量和平均碳密度依旧呈现下降趋势,分别下降 1.40×10^6 t 和 3.17 t/hm^2,下降幅度增大。从不同土地利用类型的角度来看,黎平县 2005—2025 年不同土地利用类型的碳储量均有变化,其碳储量主要变化趋势为:林地的碳储量一直呈现下降趋势,由 2005 年的 7.17×10^7 t 下降到 2025 年的 6.72×10^7 t,且在 2005—2015 年下降缓慢,2015—2025 年降速加快;草地由 2005 年的 9.64×10^6 t 增加到 2025 年的 1.22×10^7 t,且 2015—2025 年增加明显多于 2005—2015;建设用地由 2005 年的 1.29×10^5 t 增加到 2025 年的 2.83×10^5 t;耕地的碳储量呈现先减少后增加的趋势,由 2005 年的 9.92×10^6 t 下降到 2015 年的 9.69×10^6 t,再增加到 2025 年的 1.01×10^7 t。

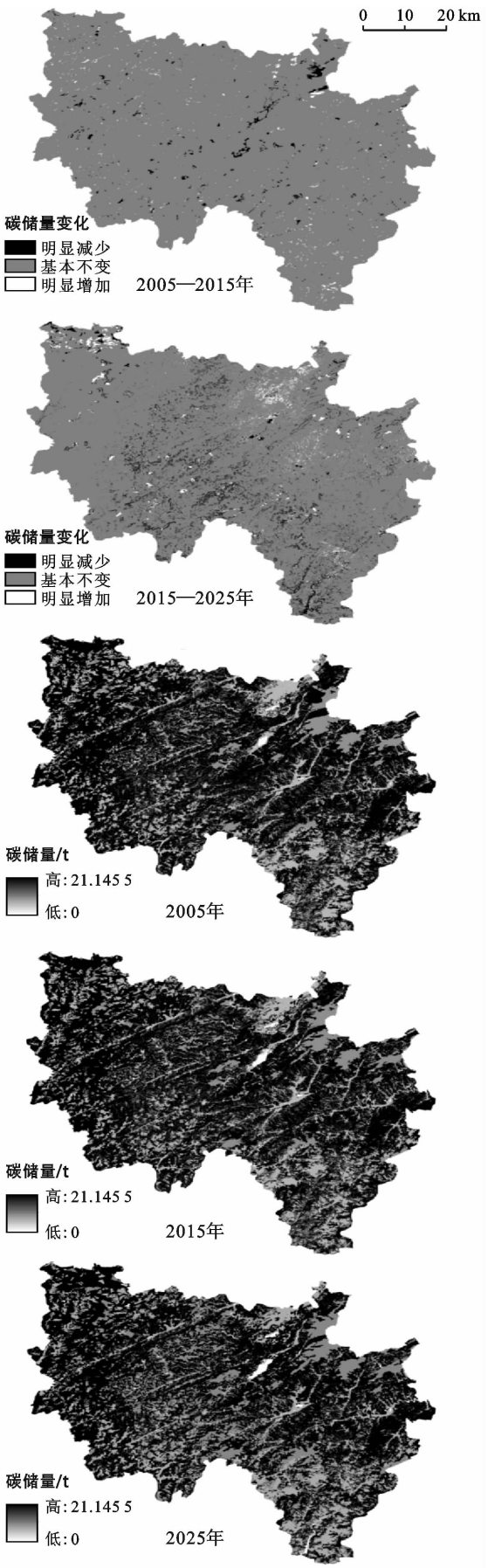


图 1　研究区 2005,2015,2025 碳储量及 2005－2025 年碳储量变化空间分布

为清楚探明碳储量变化情况,本文将 2005—2025 年碳储量变化分为 3 类:明显减少、基本不变、明显增加(图 1)。由表 6 可知,研究区碳储量以基本不变为主,所占比例 89%以上。其中 2005—2015 年明显减少区占比 1.57%,整体分布较为扩散,相对集中的黎平县城区域的碳储量下降是由建设用地的扩张所造成的,而县城以北高屯镇的碳储量下降则是由林地向草地转换所致;2015—2025 年明显增加区域占0.9%,其直接原因为耕地、草地向林地的转化,与退耕还林还草工程有关。2015—2025 年,明显减少和明显增加区域均有所增加,明显减少区域占比 6.58%,明显增加区域占比 2.46%,碳储量减少情况与林地、草地的相互转换和建设用地的大肆扩张表现一致。综上所述,近年来黎平县生态系统固碳能力呈减弱趋势,建设用地的大肆扩张和林地的大面积减少是生态系统碳储量下降的直接原因。因此,对黎平县土地利用结构优化显得尤为重要,未来需合理的控制建设用地扩张范围,采取提高林地所占比重等一系列的土地利用调控措施将有助于实现黎平县低碳经济建设和生态环境的可持续发展。

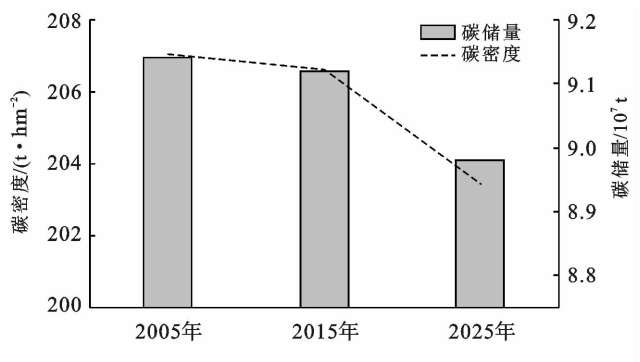


图 2　研究区碳储量、碳密度变化趋势

3　讨论与结论

3.1　讨　论

根据研究结果可知,黎平县在近年来生态系统固碳能力有所减弱,2005—2015 年总碳储量减少了 2.00×10^5 t,而陆地生态系统的固碳能力与地表覆被情况密切相关,林地作为碳储量最丰富的土地利用类型,承担着主要碳汇功能,大面积的林地转出是碳储量减少的重要原因之一,未来应重点加强林区保护力度。本文通过结合区域实测数据和气象校正数据所获取的碳密度值相较于以往研究直接采用全国尺度数据更加具有合理性和可靠性。通过对蔡广鹏[33]在贵州省绥阳县的草地地上碳储量研究结果进行计算,发现草地地上生物量碳密度为 3.56 t/hm^2,与本文通

过模型修正获得的草地地上生物量碳密度(3.6 t/hm^2)非常接近,说明本文的研究结果符合研究区实际情况。固本文的研究结果合理的评估了黎平县生态系统固碳能力,能够为黎平县的生态环境和可持续发展提供一定的参考。但仍存在一定的不足之处:①在利用 CA-Markov 模型进行土地利用格局预测时未充分考虑如禁止建设区、基本农田保护区等地方相关政策因素,使得土地利用预测结果与政策环境结合较弱;②InVEST 模型的碳储量模块在计算当中简化了碳在陆地生态系统当中的循环过程,其更加侧重于不同地表覆被类型之间的碳密度差异,采用单一土地利用类型的碳密度值来估算碳储量,忽视了土壤类型、植被种类和年龄结构所带来的固碳能力差异,在一定程度上影响了碳储量的估算精度。因此,在今后的研究当中,可结合耕地保护、生态保护等相关政策模拟不同土地利用情境下的生态系统固碳能力,并耦合土地利用内部碳循环机制,加强对不同时期、不同土地利用类型碳密度的野外调查和监测,以期利用更加全面的试验观测数据来提高区域性生态系统碳储量评估的准确性。

表 6 研究区碳密度变化量统计

时 段	明显减少		基本不变		明显增加	
	栅格数	比例/%	栅格数	比例/%	栅格数	比例/%
2005—2015 年	76 541	1.57	4 783 817	97.54	44 198	0.89
2015—2025 年	322 626	6.58	4 461 268	90.96	120 662	2.46
2005—2025 年	379 719	7.74	4 377 552	89.25	147 285	3.01

3.2 结 论

(1) 2005—2015 年黎平县耕地、林地、未利用地呈减少趋势,建设用地、草地、水域呈增加趋势,其中建设用地扩张最为明显,增幅为 79.955%。2015—2025 年预测结果为林地持续减少,草地、耕地、建设用地和水域增加,其中,林地、草地变化幅度增大,耕地由 2005—2015 年的降幅 2.37%变为 2015—2025 年的增幅 4.21%。

(2) 2015 年黎平县生态系统碳储量和平均碳密度分别为 9.12×10^7 t 和 206.61 t/hm^2,2005—2015 年分别下降 2.00×10^5 t 和 0.45 t/hm^2,生态系统固碳能力减弱,林地的大面积转出和建设用地的扩张是碳储量下降的直接原因。2025 年黎平县生态系统碳储量和平均碳密度的预测值分别为 8.98×10^7 t 和 203.44 t/hm^2,相比 2005—2015 年减少幅度增大,与林地面积减少趋势保持一致。

[参 考 文 献]

[1] Piao S, Fang J, Ciais P, et al. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China [J]. Nature, 2009, 458 (7241): 1009-1013.

[2] 陈广生,田汉勤. 土地利用/覆盖变化对陆地生态系统碳循环的影响[J]. 植物生态学报,2007,31(2):189-204.

[3] 刘迎春,高显连,付超. 基于森林资源清查数据估算中国森林生物量固碳潜力[J]. 生态学报,2019,39(11):4002-4010.

[4] Dorji T, Odeh I O A, Field D J, et al. Digital soil mapping of soil organic carbon stocks under different land use and cover types in montane ecosystems, Eastern Himalayas [J]. Forest Ecology and Management, 2014, 318(3): 91-102.

[5] 张明阳,王克林,刘会玉. 基于遥感影像的桂西北喀斯特区植被碳储量及密度时空分异[J]. 中国生态农业学报,2013,21(12):1545-1553.

[6] 肖红艳,袁兴中,李波. 土地利用变化碳排放效应研究:以重庆市为例[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版),2012,29(1):38-42,115.

[7] 郜红娟,韩会庆,张朝琼. 乌江流域贵州段 2000—2010 年土地利用变化对碳储量的影响[J]. 四川农业大学学报,2016,34(1):48-53,84.

[8] Baccini A, Goetz S J, Walker W S, et al. Estimated carbon dioxide emissions from tropical deforestation improved by carbon-density maps [J]. Nature Climate Change, 2012, 2(3): 182-185.

[9] Nogueira E M, Yanai A M, de Vasconcelos S S, et al. Carbon stocks and losses to deforestation in protected areas in Brazilian Amazonia [J]. Regional Environmental Change, 2018, 18(5): 261-270.

[10] 丛文翠,孙小银. 基于 GIS 和 InVEST 模型的日照市固碳能力研究[J]. 水土保持通报,2018,38(5):200-205.

[11] Lai Li, Huang Xianjin, Yang Hong, et al. Carbon emissions from land-use change and management in China between1990 and 2010 [J]. Science Advances, 2016, 2(11): e1601063.

[12] 吴佩君,刘小平,黎夏. 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[J]. 地理与地理信息科学,2016,32(5):22-28.

[13] 刘晓娟,黎夏,梁迅. 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[J]. 热带地

理,2019,39(3):397-409.

[14] 孔君洽,杜泽玉,杨荣.黑河中游土地利用/覆被变化及其对碳储量影响的预测[J].中国沙漠,2019,39(3):87-97.

[15] 房飞,李滨勇,唐海萍.基于土地利用结构优化的土壤有机碳储量预测分析:以内蒙古多伦县为例[J].干旱区研究,2016,33(1):67-73.

[16] Yang Xu, Ji Guangxing, Wang Chong, et al. Modeling nitrogen and phosphorus export with InVEST model in Bosten Lake basin of Northwest China [J]. PloS One, 2019,14(7):e0220299.

[17] Zhang Yihan, Li Xia, Liu Xiaoping, et al. Self-modifying CA model using dual ensemble Kalman filter for simulating urban land-use changes [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2015,29(9):1612-1631.

[18] Huang Yingchun, Nian Peihao, Zhang Wenxin. The prediction of interregional land use differences in Beijing: A Markov model [J]. Environmental Earth Sciences, 2015,73(8):4077-4090.

[19] 赵冠伟,陈颖彪,陈健飞. CA-Markov 模型的空间尺度敏感性研究[J].地理科学,2011,31(8):897-902.

[20] 张津,朱文博,吴舒尧.基于 CLUE-S 模型的京津冀城市群土地利用变化时空模拟[J].北京大学学报(自然科学版),2018,54(1):115-124.

[21] 李默然,丁贵杰.贵州黔东南主要森林类型碳储量研究[J].湖南 长沙:中南林业科技大学学报,2013,33(7):119-124.

[22] 李克让,王绍强,曹明奎.中国植被和土壤碳贮量[J].中国科学(D 辑:地球科学),2003,33(1):72-80.

[23] 方精云,郭兆迪,朴世龙. 1981—2000 年中国陆地植被碳汇的估算[J]. 中国科学(D 辑:地球科学),2007,37(6):804-812.

[24] Alam S A, Starr M, Clark B J F. Tree biomass and soil organic carbon densities across the Sudanese woodland savannah: A regional carbon sequestration study [J]. Journal of Arid Environments, 2013, 89(1):67-76.

[25] Giardina C P, Ryan M G. Evidence that decomposition rates of organic carbon in mineral soil do not vary with temperature [J]. Nature, 2000,404(6780):858-861.

[26] 陈光水,杨玉盛,谢锦升.中国森林的地下碳分配[J].生态学报,2007,27(12):5148-5157.

[27] 张峰.中国草原碳库储量及温室气体排放量估算[D].甘肃 兰州:兰州大学,2010.

[28] 朱超,赵淑清,周德成. 1997—2006 年中国城市建成区有机碳储量的估算[J].应用生态学报,2012,23(5):1195-1202.

[29] 黄玫,季劲钧,曹明奎.中国区域植被地上与地下生物量模拟[J].生态学报,2006,26(12):4156-4163.

[30] 朴世龙,方精云,贺金生.中国草地植被生物量及其空间分布格局[J].植物生态学报,2004,28(4):491-498.

[31] 方精云,刘国华,徐嵩龄.我国森林植被的生物量和净生产量[J].生态学报,1996,16(5):497-508.

[32] 虎帅,张学儒,官冬杰.基于 InVEST 模型重庆市建设用地扩张的碳储量变化分析[J].水土保持研究,2018,25(3):323-331.

[33] 蔡广鹏,韩会庆,张凤太.喀斯特地区贵州省绥阳县土地利用/覆被变化对陆地植被碳储量的影响[J].水土保持研究,2012,19(4):122-124,130,295.

(上接第 91 页)

[15] Di Xianghong, Hou Xiyong, Wang Yuandong, et al. Spatial-temporal characteristics of land use intensity of coastal zone in China during 2000—2010 [J]. Chinese Geographical Science, 2015,25(1):51-61.

[16] 黄勇,王凤友,蔡体久,等.环渤海地区景观格局动态变化轨迹分析[J].水土保持学报,2015,29(2):314-319.

[17] Wen Qingke, Zhang Zengxiang, Xu Jinyong, et al. Spatial and temporal change of wetlands in Bohai Rim during 2000—2008: An analysis based on satellite images [J]. Journal of Remote Sensing, 2011,15(1):183-191.

[18] Ding Yumei, Wei Hao. Modeling the impact of land reclamation on storm surges in Bohai Sea, China [J]. Nat. Hazards, 2017,85(1):559-573.

[19] 李博,田闯,史钊源.环渤海地区海洋经济增长质量时空分异与类型划分[J].资源科学,2017,39(11):2052-2061.

[20] 刘宏娟,郑丙辉,胡远满,等.基于 TM 的渤海海岸带 1988—2000 年生态环境变化[J].生态学杂志,2006,25(7):789-794.

[21] 霍素霞,陈生涛,徐进勇,等.环渤海区域开发现状和历史评价[M].北京:海洋出版社,2015.

[22] 穆雪男.天津滨海新区围填海演进过程与岸线、湿地变化关系研究[D].天津:天津大学,2014.

[23] 刘晓,邢元军,罗鹏.基于时序 NDVI 数据的洞庭湖区湿地植被类型信息提取[J].林业资源管理,2017(4):103-108.

[24] 徐涵秋.利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究[J].遥感学报,2005,9(5):589-595.

[25] 吴文挺,田波,周云轩,等.中国海岸带围垦遥感分析[J].生态学报,2016,36(16):5007-5016.

[26] 刘思峰,蔡华,杨英杰,等.灰色关联分析模型研究进展[J].系统工程理论与实践,2013,33(8):2041-2046.