

# 基于 InVEST 模型的黔中喀斯特地区建设用地扩张碳储量变化研究

李 月, 罗红芬

(贵州财经大学 公共管理学院, 贵州 贵阳 550025)

**摘 要:**选择典型生态脆弱区黔中典型喀斯特地区—普定县为研究对象,采用土地利用动态度和土地利用转移分析方法,应用 InVEST 模型测算 2003—2020 年的陆地生态系统碳储量及其空间分布格局,探讨建设用地扩张对碳储量变化的影响。结果表明:1)2003—2020 年建设用地面积一直保持增加趋势,扩张速率表现为减缓态势,空间变化在中南部区域最为显著,主要侵占旱地、水田和灌木林地。2)普定县碳储量整体呈上升趋势,累计增加  $15.07 \times 10^5$  t,主要因碳密度较高的灌木林地大幅挤占旱地。3)建设用地变化致使碳储量损失了  $22.37 \times 10^4$  t,以中南部中心城区碳储量下降最为明显。因此,建议研究区在城市扩张过程中优先考虑碳密度较低的未利用地,同时限制建设用地对旱地、水田以及灌木林地的占用,以减少建设用地扩张对区域碳储存能力的影响。

**关键词:**贵州;喀斯特;InVEST 模型;建设用地;碳储量

**中图分类号:**S771.8

**文献标志码:**A

**文章编号:**1001-7461(2024)01-0185-08

## Carbon Storage Change of Construction Land Expansion in Central Guizhou's Karst Region Based on InVEST Model

LI Yue, LUO Hong-fen

(School of Public Administration, Guizhou University of Finance and Economics, Guiyang 550025, Guizhou, China)

**Abstract:** To elucidate the effect of construction land expansion on carbon storage capacity of terrestrial ecosystem in typical ecologically vulnerable areas in China, Puding County, a typical Karst area in central Guizhou, was selected as the research object. The dynamic attitude index and land use transfer analysis methods were used to estimate and analyze the carbon storage and its spatial distribution pattern of different land types in the county from 2003 to 2020, combined with the carbon model InVEST, and the influence of construction land expansion on the change of carbon storage was discussed. The results showed that 1) from 2003 to 2020, the construction land maintained an expansion trend, and the expansion rate showed a slowing trend. Spatial variation was concentrated in the central and southern regions and encroachment mainly occurred on dry land, paddy land, and shrubland. 2) The ecosystem carbon storage in Puding County showed an overall upward trend from 2003 to 2020, with a cumulative increase of  $15.07 \times 10^5$  t. The increase in shrubland was the main reason for the increase in carbon storage. 3) The change of construction land resulted in a loss of  $22.37 \times 10^4$  t of carbon storage, which was mainly reflected in the significant decrease of carbon storage in the central urban area and the southern region, which was due to the conversion of shrub land and paddy land to construction land. Therefore, it is suggested that unused land should be given priority in the process of urban expansion in the study area, and the occupation of construction land to dry land, paddy field and shrub land should be limited to reduce the impact of construction land expansion.

收稿日期:2022-11-14 修回日期:2023-02-09

基金项目:贵州省教育厅青年科技人才成长项目(黔教合 KY 字[2022]202 号);贵州财经大学在校学生科学研究项目(2022ZXSY110)。

第一作者:李 月,博士,副教授。研究方向:土地资源管理与生态修复。E-mail:976438528@qq.com

sion on regional carbon storage capacity.

**Key words:** Guizhou; Karst; InVEST model; construction land; carbon storage

近百年的气候变化已经给全球自然生态系统和社会经济系统带来了深刻影响<sup>[1]</sup>。陆地生态系统中的碳储量能够通过吸收和释放大气中的温室气体,发挥巨大碳汇作用,对大气温室气体排放量以及碳循环的平衡具有重要意义<sup>[2]</sup>。土地利用覆被变化作为影响区域碳储量时空变化的关键原因之一<sup>[3-7]</sup>,土地利用变化的碳储量影响已成为全球气候变化及陆地生态系统碳汇研究的重点与热点。

目前,国内外学者已经从土地利用的角度揭示了不同尺度下的碳储量空间变化<sup>[2-11]</sup>。Bolin<sup>[8]</sup>通过对全球各地不同用地的碳储量进行分析,发现土地利用变化是导致大气环境 CO<sub>2</sub> 含量波动的主要因素;刘洋等<sup>[9]</sup>探究并预测了疏勒河流域 1990—2015 年及 2015—2040 年流域生态系统碳储量时空变化特征及其与土地利用方式之间的关系,发现未利用地向耕地和草地转化有利于碳储量增加,而草地向耕地和未利用地的转化则导致碳储量减少;侯瑞萍等<sup>[12]</sup>估算了 2020 年长江经济带林地和其他生物质碳储量和碳汇量,并发现乔木林地的碳储量和碳汇量所占比例最大,以上研究均表明森林砍伐、林地转出会导致大量温室气体从陆地碳库排放至大气环境中。InVEST 模型作为研究土地利用变化与生态系统服务功能相互关系较为成熟的生态模型之一,长期以来得到了广泛应用<sup>[9-17]</sup>。刘晓娟等<sup>[16]</sup>通过耦合 FLUS-InVEST 模型,从土地利用视角出发对中国 2100 年的陆地生态系统碳储量进行模拟,并探讨其空间分异;邓喆等<sup>[17]</sup>基于 InVEST 模型 Carbon 模块计算因土地利用变化所导致的生态系统碳储量变化。大量研究表明,土地利用变化过程直接影响区域内植被、土壤等物质的固碳能力,进而影响整个区域碳储量的时空变化。纵观现有研究成果,内容主要聚焦在森林、农田、湿地等生态用地的碳储量时空变化规律以及驱动因素研究,而基于建设用地规模扩张的区域碳储量变化相对匮乏。在社会经济发展进程中,建设用地主要通过挤占林地、耕地等生态用地迅速扩张,致使陆地生态系统碳储量大幅流失,造成生态服务功能严重退化<sup>[18]</sup>。近年来,喀斯特地区受自身的脆弱性以及人类活动的影响,生态环境日益恶化,因此,探究喀斯特地区建设用地扩张引起的碳储量空间变化对区域碳平衡管理具有重要意义。

贵州省作为国家生态文明试验区,具有人口容量小、生态系统敏感且脆弱等特征<sup>[19]</sup>,拥有巨大的固碳潜力。普定县地处黔中,岩溶分布广泛,土层浅

薄,水土流失严重<sup>[19]</sup>,在快速城镇化和人口剧增的影响下,建设用地需求不断上升,区域土地利用方式的剧烈变化给敏感脆弱的生态环境带来巨大压力。本研究以黔中喀斯特区——普定县为对象,基于 2003、2010、2020 年 3 期遥感影像数据,选取土地利用动态变化指数和土地利用转移矩阵方法,结合 InVEST 模型 Carbon 模块,估算 2003—2020 年不同用地类型生态系统碳储量,探究区域生态系统碳储量空间分布格局和建设用地扩张对生态系统碳储量变化的影响,以期为区域生态可持续发展和典型生态脆弱区未来用地结构优化提供决策参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

普定县(105°27′49″—105°58′51″E,16°26′36″—26°31′42″N)位于贵州省西部,隶属安顺市,位于素有“黔之腹,滇之喉”之称的黔中腹地(图 1),属亚热带季风湿润气候,年均降水量 1 378.2 mm。年均气温 15.1 ℃。地势总体呈南、北部高,中间低,全县总面积 1 091 km<sup>2</sup>,喀斯特地貌广泛发育,土层发育较薄,土地利用强度大。

### 1.2 数据来源与处理

所需基础数据主要包括 2003、2010、2020 年 3 期遥感影像,碳库数据包括地上植被碳库  $C_{above}$ 、地下植被碳库  $C_{below}$ 、土壤有机碳库  $C_{soil}$ 、死亡有机碳库  $C_{dead}$  4 大碳库(表 1)。以 3 期遥感影像为基础数据,3 期影像均采用近红外、红光与绿光波段进行标准假彩色合成,首先,以 1:10 000 地形图对 3 期影像进行几何精校正,并采用较为成熟的 FLAASH 模型进行大气校正。其次,通过监督分类、人机交互式解译法进行目视解译提取地类,最后,结合普定县土地利用现状图、Google Earth 高分辨率历史影像及全国国土调查主要数据公报等,对土地利用矢量图进行图斑修正。用地类型分为有林地、灌木林地、其他林地、草地、水田、旱地、水域、建设用地和未利用地等 9 种用地类型。

### 1.3 土地利用动态度

不同土地利用类型受自然和人为因素的干扰不同,其变化速率也不相同。而土地利用变化速率的区域差异可以用土地利用动态度模型来加以表述,单一土地利用动态度可以表示为<sup>[29]</sup>

$$K = \frac{U_b - U_a}{U_a} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $T$  为研究时段;  $K$  为研究时段某类用地类型的变化率;  $U_a$  和  $U_b$  分别为研究期开始和结束时段某土地利用类型的面积。

1.4 土地利用转移矩阵

转移矩阵是土地利用类型间相互转化的数量及方向定量研究的主要方法, 能够具体反映土地利用变化的结构特征和各类型之间的转移方向。转移矩阵的数学形式可以表示为<sup>[29]</sup>

$$P_{ij} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \cdots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \cdots & P_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ P_{n1} & P_{n2} & \cdots & P_{nn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中:  $P$  表示面积;  $n$  表示土地利用类型数;  $i, j$  分别表示研究初期与末期的土地利用类型;  $P_{ij}$  表示研究期间用地类型  $i$  向用地类型  $j$  的转移面积。

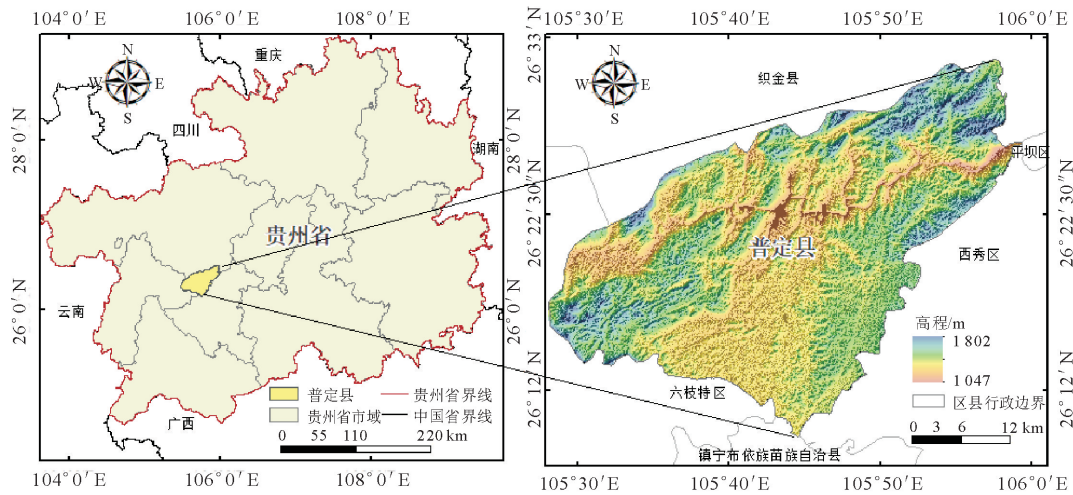


图 1 研究区地理位置

Fig. 1 Overview of the geographical location of the study area

表 1 研究区数据来源

Table 1 Data sources for the study area

基础数据	数据来源	数据描述
2003、2010、2020 年遥感影像	地理空间数据云 ( <a href="http://www.gscloud.cn/">http://www.gscloud.cn/</a> )	Landsat7 ETM 影像, 分辨率 30 m×30 m
生态系统碳库	邹文涛等 <sup>[22]</sup> 、李默然等 <sup>[23]</sup> 、罗怀良等 <sup>[24]</sup> 、黄从红 <sup>[25]</sup> 、李义平 <sup>[26]</sup> 、解宪丽等 <sup>[27]</sup> 、李克让等 <sup>[28]</sup>	$C_{above}$ 、 $C_{below}$ 、 $C_{soil}$ 、 $C_{dead}$

1.5 InVEST 模型法

通过文献检索得到碳密度参数, 土地利用碳密度数据主要收集研究区以及相邻区域范围内的研究成果, 其中有林地、其他林地参考邹文涛等<sup>[22]</sup>的研究; 灌木林地碳密度值参考李默然等<sup>[23]</sup>的研究成果; 旱地、水田、草地、未利用地碳密度值主要参考罗怀良等<sup>[24]</sup>和黄从红<sup>[25]</sup>的研究成果; 建设用地参考李义平<sup>[26]</sup>的研究; 其他地类主要参考解宪丽等<sup>[27]</sup>和李克让等<sup>[28]</sup>的研究成果(表 2)。土地利用碳密度数据结合土地利用数据(表 2), 基于 InVEST 模型中 Carbon 模块评估普定县碳储量的变化, 碳储量计算公式为

$$C = C_{bove} + C_{below} + C_{soil} + C_{dead} \quad (3)$$

式中:  $C$  表示生态系统碳储量;  $C_{above}$  表示地上植被碳库;  $C_{below}$  表示地下植被碳库;  $C_{soil}$  表示土壤有机碳库;  $C_{dead}$  表示死亡有机碳库。

2 结果与分析

2.1 土地利用变化分析

2.1.1 土地利用动态度分析 利用土地利用动态度方法(式(1))对普定县各用地类型变化速率进行分析。由表 3、图 2 可知, 2003—2020 年建设用地动态变化最剧烈, 2003—2010 年动态度高达 14.13%, 而 2010—2020 年变化速率出现下降, 动态度降为 11.13%; 灌木林地面积在 2003—2010 年不断增加, 且动态变化程度仅次于建设用地, 动态度为 10.09%, 而水田、水域、其他林地、旱地在 2003—2010 年动态变化程度相对较小, 且用地规模均呈减少的变化态势; 2010—2020 年水域变化速率上升至 5.32%, 其他林地变化速率大幅增加, 增幅达 107.06%, 表明其他林地在该时期以更快的速度缩减, 水田和旱地的减少速率逐渐减弱, 动态度分别为 3.64%、0.84%。



2.1.2 建设用地时空变化特征分析 对各个时期的土地利用类型转移情况进行分析(图 3)。由图 3(a)可知,2003—2010 年普定县旱地转出最多,共流出 223.19 km<sup>2</sup>,其中有 9.64%转入建设用地,水域转化面积最小,仅有 12.23 km<sup>2</sup>。由图 3(b)得知,2010—2020 年仍主要以旱地转出为主,但转出面积降低至 144.78 km<sup>2</sup>,其中有 20.67%转入建设用地。对 2003—2010、2010—2020 年普定县建设用地转移情况进行分析(表 4),发现研究区在 2003—2020 年建设用地经历了“快速扩张-平缓扩张”的变化过程。其中 2003—2010 年,建设用地净扩张 23.05 km<sup>2</sup>,旱地和水田的贡献率分别为 73.88%和 25.99%,说明占用旱地和水田是研究区该时期城镇

表 2 普定县土地利用类型碳密度				
Table 2 Carbon density of land use types in Puding County				
t · hm <sup>-2</sup>				
土地利用类型	碳密度(以 C 计)			
	地上	地下	土壤	死亡有机物
有林地	31.92	6.38	146.82	3.50
其他林地	35.03	7.01	91.70	3.50
灌木林地	26.60	67.50	94.00	3.50
草地	0.82	0.87	89.20	1.00
水田	5.42	1.96	146.24	1.00
旱地	3.29	0.59	109.68	1.00
水域	0.00	0.00	0.00	0.00
建设用地	0.00	0.00	111.26	0.00
未利用地	0.74	0.13	69.92	0.00

表 3 2003—2020 年土地利用动态度									
Table 3 Land use dynamic attitude from 2003 to 2020									
%									
研究时段	有林地	其他林地	灌木林地	草地	水田	旱地	水域	建设用地	未利用地
2003—2010 年	8.54	-3.42	10.09	2.39	-4.86	-3.20	-3.65	14.13	0.72
2010—2020 年	3.54	-7.08	3.92	-6.08	-3.64	-0.84	5.32	11.13	-8.69

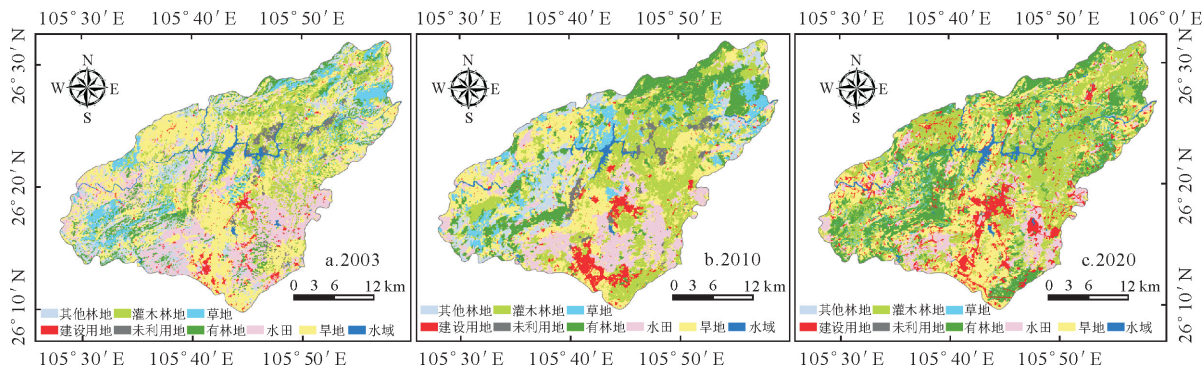


图 2 2003—2020 年普定县土地利用现状

Fig. 2 Land use status map of Puding County from 2003 to 2020

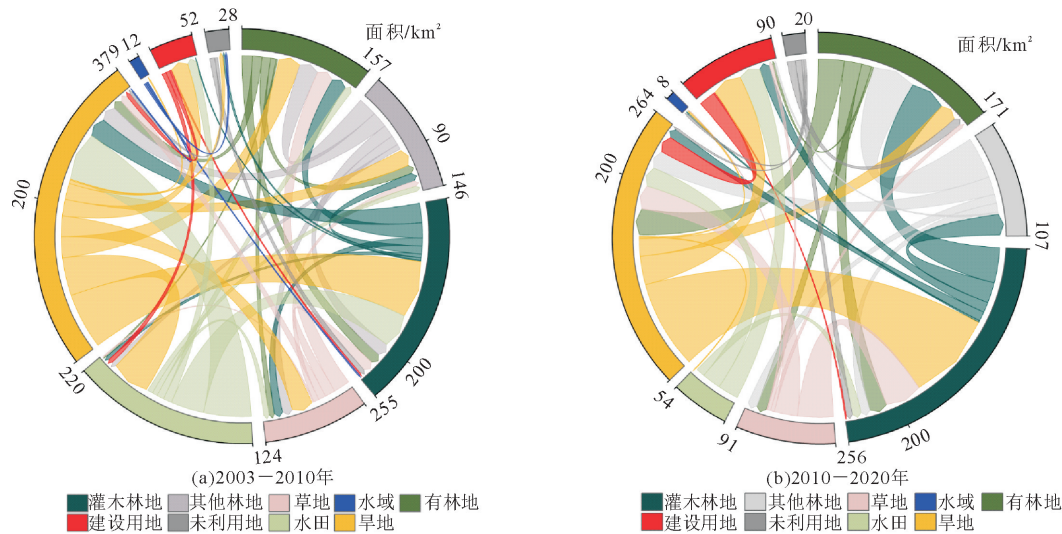


图 3 2003—2010 年普定县土地利用转移矩阵弦图

Fig. 3 Chord diagram of land use transfer matrix in Puding County from 2003 to 2010

表 4 2003—2020 年普定县建设用地变化统计

Table 4 Statistics on the change of construction land in Puding County from 2003 to 2020

km<sup>2</sup>

土地利用类型	2003—2010 年			2010—2020 年		
	转出	转入	总计	转出	转入	总计
有林地	0.33	0.43	0.09	0.51	2.29	1.78
其他林地	0.25	0.83	0.59	0.03	2.02	1.99
灌木林地	2.32	1.37	-0.95	1.35	10.67	9.32
草地	0.17	0.32	0.16	0.03	3.41	3.37
水田	5.60	11.58	5.99	0.06	21.73	21.67
旱地	5.44	22.47	17.03	17.26	29.93	12.67
水域	0.06	0.12	0.07	0.08	0.27	0.19
未利用地	0.07	0.15	0.08	0.00	0.57	0.56
总计	14.23	37.28	23.05	19.32	70.89	51.56

扩张的主要方式。2010—2020 年,建设用地共转入 70.89 km<sup>2</sup>,其中旱地、水田与灌木林地的贡献率最高,分别达到 42.22%、30.65%、15.05%;共转出面积 19.32 km<sup>2</sup>,年均转出面积有所减少,该时期灌木林地也成为城镇扩张占用的主要用地类型之一,究其原因主要与建设用地需求上升有关。

2003—2020 年普定县建设用地扩张情况见图 4,建设用地主要分布在地势相对平缓的中部和南部区域。2010 年建设用地面积相比 2003 年扩张了约 2 倍,主要以南部区域最为显著,向东边呈带状蔓延

扩张;其次为中部区域,由中心城区向南部以及东南部方向呈带状延伸发展,东部、北部则以零星点状零散分布,主要占用水田和旱地。2020 年建设用地面积上升至 97.91 km<sup>2</sup>,主要沿中心城区向东、南部区域呈带状发展,通过大规模占用水田向南部扩张,向东边扩张主要侵占旱地;南部伴有少量建设用地占用旱地。总的来说,普定县建设用地呈现南部率先大幅扩张后缩减、中部后期显著扩张、东部后期显著扩张的地域特征。

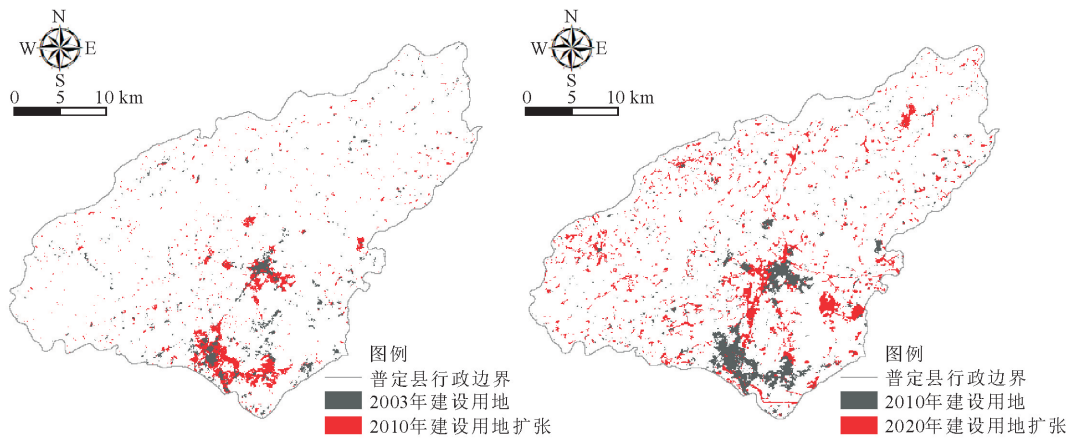


图 4 2003—2020 年普定县建设用地扩张情况

Fig. 4 Expansion of construction land in Puding County from 2003 to 2020

2.2 碳储量时空变化规律特征分析

由图 5 可见,研究区不同历史时期各土地利用类型碳储量发生显著变化。基于 InVEST 模型 Carbon 模块,得出 2003—2020 年普定县生态系统碳储量分别为  $150.22 \times 10^5$ 、 $158.34 \times 10^5$  t 和  $165.29 \times 10^5$  t,整体呈逐期递增趋势,累计增加  $15.07 \times 10^5$  t。用地类型中灌木林地碳储量较多且增值最大,2003—2010 年灌木林地碳储量年均增量达  $2.72 \times 10^5$  t,未利用地碳储量变化最为稳定,2003—2020 年碳储量仅下降  $1.21 \times 10^5$  t。2003—2020 年建

设用地碳储量由  $2.29 \times 10^5$  t 增至  $10.87 \times 10^5$  t,各期分别上升  $2.47 \times 10^5$ 、 $5.86 \times 10^5$  t。

由图 6 可知,普定县 2003—2020 年灌木林地面积增加  $191.35 \text{ km}^2$ ,碳储量上升  $35.17 \times 10^5$  t,是总增量的 2.33 倍,而建设用地面积净增加  $74.61 \text{ km}^2$ ,碳储量仅增加  $8.85 \times 10^5$  t,建设用地单位面积碳储量增值相对较少。水田碳储量损失最多,达  $18.91 \times 10^5$  t,是用地规模萎缩最大、碳储量损失最严重的地类。因此,灌木林地是普定县碳储量上升的主要因素,2020 年普定县固碳能力较强的地类为灌木林

地,而水田的固碳能力逐渐减弱。

由图 7 可知,普定县碳储量较高的区域集中分布在东北部和西南部,碳储量低值区分布在中南部区域,这可能与东北、西南部建设用地扩张程度有关。进一步分析碳储量在空间上的变化特征发现(图 8),2003—2020 年,普定县碳储量逐期升高且空间演变极其明显,整体表现为东北部和西南部地区

碳储量增加,中南部区域碳储量显著降低。通过叠加土地利用现状图(图 2)和碳储量空间分布图(图 7)可知,普定县东北部和西南部区域的碳储量显著增加区域主要表现为大量灌木林地、有林地转入,而中北部地区城市扩张剧烈,建设用地广泛分布,该区域碳储量减少地区主要以灌木林地、水田转为建设用地为主。

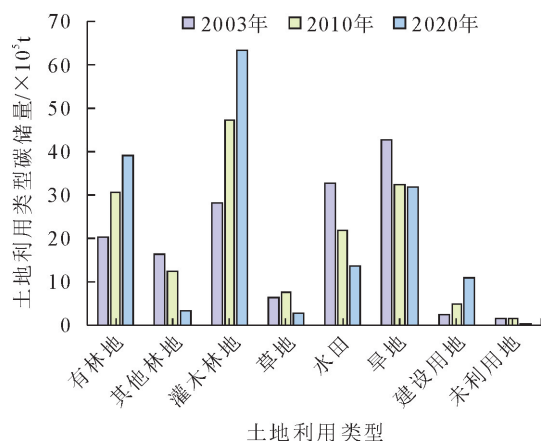


图 5 2003—2020 年普定县土地利用类型碳储量

Fig. 5 Carbon storage of land use types in Puding County from 2003 to 2020

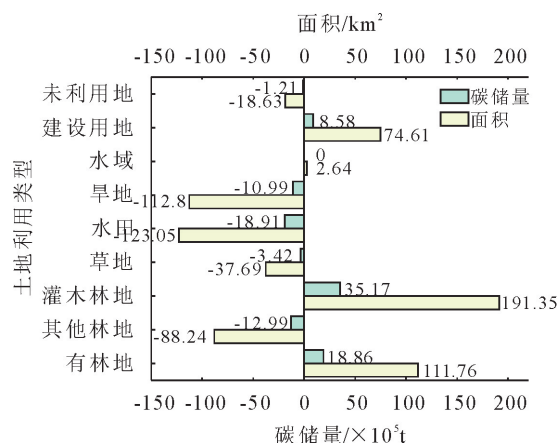


图 6 2003—2020 年普定县土地利用变化及其碳储量变化

Fig. 6 Land use change and its carbon storage change in Puding County from 2003 to 2020

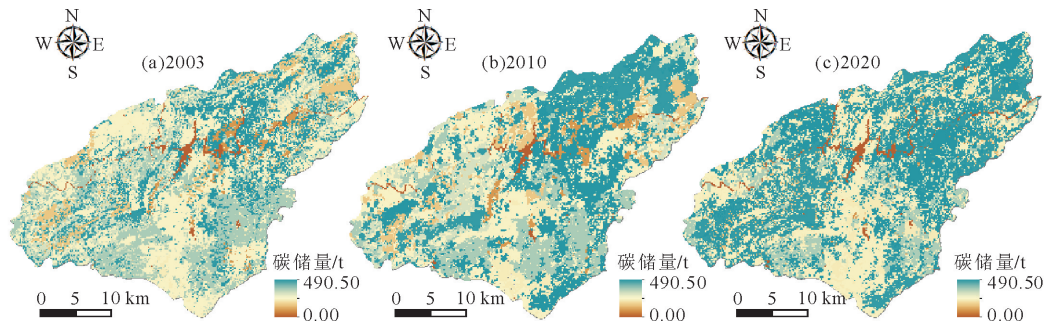


图 7 2003—2020 年普定县碳储量空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of carbon storage in Puding County from 2003 to 2020

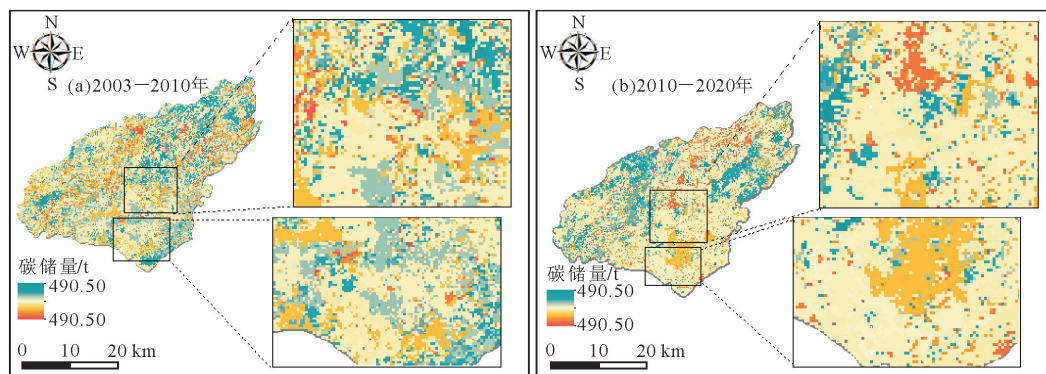


图 8 2003—2020 年普定县碳储量空间变化

Fig. 8 Spatial variation of carbon storage in Puding County from 2003 to 2020

### 2.3 建设用地扩张对碳储量的影响

由表 5 可知,2003—2020 年普定县建设用地变

化致使碳储量损失了  $22.37 \times 10^4 \text{ t}$ ,说明建设用地在转出过程中的碳储增量远远小于其扩张引起的碳损



失量。其中,2003—2010 年建设用地变化碳储量流失  $2.53 \times 10^4 \text{ t}$ ,其转出过程中,建设用地向水田和灌木林地转移,使得水田、灌木林地碳库碳储量分别增加  $2.14 \times 10^4$ 、 $1.71 \times 10^4 \text{ t}$ ;在扩张进程中,建设用地仅占用草地、水域、未利用地,有利于生态系统碳储量增加,占用其他用地碳储量均有不同程度的流失,其中占用水田使得水田碳库减少碳储量  $4.62 \times 10^4 \text{ t}$ 。

2010—2020 年,建设用地变化致使碳储量净损失达  $19.84 \times 10^4 \text{ t}$ ,损失量约为上一阶段的 8 倍。主要因为该时期建设用地转出仅增加碳储量  $2.76 \times 10^4 \text{ t}$ ,且 60.29%均来源于建设用地转灌木林地,而建设用地扩张碳储量损失了  $22.60 \times 10^4 \text{ t}$ ,是其转出碳储量增加的 8.18 倍,其中灌木林地和水田转为建设用地分别引起碳储量损失  $8.72 \times 10^4$ 、 $9.54 \times 10^4 \text{ t}$ 。

表 5 2003—2020 年普定县建设用地转化的碳储量变化

Table 5 Carbon storage changes of construction land conversion in Puding County from 2003 to 2020  $\times 10^4 \text{ t}$

土地利用类型	2003—2010 年			2010—2020 年		
	建设用地转出	建设用地转入	总计	建设用地转出	建设用地转入	总计
有林地	0.18	-0.18	0.00	0.57	-2.18	-1.60
其他林地	0.05	-0.24	-0.19	0.01	-0.62	-0.61
灌木林地	1.71	-1.09	0.62	1.67	-10.39	-8.72
草地	-0.03	0.03	0.00	-0.02	0.70	0.68
水田	2.14	-4.62	-2.48	0.07	-9.60	-9.54
旱地	0.15	-0.69	-0.54	0.58	-1.01	-0.44
水域	-0.06	0.09	0.03	-0.11	0.34	0.23
未利用地	-0.02	0.05	0.03	0.00	0.16	0.16
总计	4.12	-6.65	-2.53	2.76	-22.60	-19.84

3 讨论

3.1 建设用地扩张特征

随着我国西部大开发的实施,黔中经济区普定县城镇化水平显著提升,社会经济条件的作用逐渐凸显,建设用地扩张剧烈,在地势条件相对平坦的中南部中心城区表现尤为明显。2003—2020 年,建设用地一直保持扩张趋势,扩张速率表现为减缓态势,空间变化主要集中在中南部区域,集中连片分布明显,与城市发展范围保持一致;呈零点状分布的建设用地在 2010—2020 年大幅扩张,主要原因可能是由于各乡镇的城镇化水平显著提升所导致,建设用地面积增加主要由水田、灌木林地 2 种地类转入。虽然建设用地面积持续增加,但值得注意的是,2010 年南部呈带状分布的建设用地以及分布在中心城区西部的建设用地,于 2020 年逐步恢复为旱地,这可能是由于在 2016 年普定县实施城乡建设用地增减挂钩,拆旧区复垦耕地引起的。

3.2 建设用地扩张的碳储量变化

普定县在 2003—2020 年因建设用地扩张使得中南部中心城区碳储量大幅下降,用地类型变化具体表现为灌木林地、水田转为建设用地,可能由于该区域灌木林地、水田在转为建设用地的过程中,进入土壤的腐殖质减少,土壤腐殖质的矿化作用增加,进而使得土壤碳储量减少<sup>[29]</sup>,这与向书江等<sup>[1]</sup>对重庆主城区的研究结果较为一致,但不同的是,普定县建设用地扩张占用旱地几乎不对碳储量增加产生负面

影响,而水田和灌木林地因建设用地侵占碳储量分别损失了  $14.22 \times 10^4$ 、 $11.48 \times 10^4 \text{ t}$ ,不利于区域碳汇。因此,为了提升区域碳汇能力,应注意在建设用地扩张过程中减少水田与灌木林地的占用,优先考虑固碳能力较弱的未利用地,促进土地布局优化,减少碳排放,提高区域生态效益,以达到生态与经济协调发展的目的。

3.3 不确定分析

本研究有效探究了普定县建设用地扩张的碳储量变化,但仍存在以下不确定性:首先,由于碳密度数据主要参考喀斯特地区研究成果,部分难以获取碳密度数据的地类通常参考非喀斯特地区,但其运行结果能够清晰地反映普定县近 20 a 来建设用地扩张的碳储量时空变化规律,为更好地反映区域的生态碳储存能力,在今后喀斯特地区碳储量研究中应加强喀斯特地区用地类型碳密度实测;其次,本研究土地利用数据经国土调查资料检验,且与秦罗义等<sup>[31]</sup>对普定县土地利用结构研究相似,精度达到一定要求,但土地利用数据是通过遥感影像解译获得的,土地利用数据精度会对研究结果有所影响,因此在今后的研究中可采用更高分辨率遥感影像,减少主观误差,以提升用地类型碳储量估算精度。

4 结论

2003—2020 年建设用地一直保持扩张趋势,扩张面积达  $74.61 \text{ km}^2$ ,扩张速率表现为减缓态势,空间变化主要集中在中南部中心城区,通过侵占旱地、

水田和灌木林地得以发展。

2003—2020 年普定县生态系统碳储量整体呈上升趋势且空间演变极其明显,累计增加  $15.07 \times 10^5 \text{ t}$ ,灌木林地增加是碳储量上升的主要原因,空间变化整体表现为东北部和西南部地区碳储量增加,中南部区域碳储量降低。

建设用地转化致使碳储量损失了  $22.37 \times 10^4 \text{ t}$ ,其中 2010—2020 年损失碳储量占 88.69%,主要表现为中南部区域碳储量大幅下降,源于灌木林地、水田转为建设用地。

### 参考文献:

- [1] 向书江,张蓁,王丹,等.近 20 年重庆市主城区碳储量对土地利用/覆被变化的响应及脆弱性分析[J].自然资源学报,2022,37(5):1198-1213.  
XINAG S J,ZHANG Q,WANG D,*et al.* Response and vulnerability analysis of carbon storage to LUCC in the main urban area of Chongqing during 2000—2020 years[J]. Journal of Natural Resources,2022,37(5):1198-1213. (in Chinese)
- [2] 唐睿,彭开丽.土地利用变化对区域陆地碳储量的影响研究综述[J].江苏农业科学,2018,46(19):5-11.
- [3] 李姣,汪杰,李朗,等.洞庭湖生态经济区土地利用变化对碳储量的影响[J].生态学杂志,2022,41(6):1156-1165.  
LI J,WANG J,LI L,*et al.* Impact of land use change on carbon storage in the Dongting Lake eco-economic zone[J]. Chinese Journal of Ecology,2022,41(6):1156-1165. (in Chinese)
- [4] 刘冠,李国庆,李洁,等.基于 InVEST 模型的 1999—2016 年麻塔流域碳储量变化及空间格局研究[J].干旱区研究,2021,38(1):267-274.
- [5] 位盼盼,咎梅.伊犁地区土地覆被变化及其对植被碳储量的影响[J].西北林学院学报,2020,35(4):158-166.  
WEI P P,ZAN M. Changes of land coverage and the impact on vegetation carbon storage Yili region[J]. Journal of Northwest Forestry University,2020,35(4):158-166. (in Chinese)
- [6] 张斌,李璐,夏秋月,等.“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[J].生态学报,2022,42(6):2265-2280.
- [7] 孟祥江,何丙辉,马正锐,等.重庆市 2005—2013 年土地利用变化对植被碳储量的影响[J].西北林学院学报,2018,33(5):75-81.  
MENG X J,HE B H,MA Z R,*et al.* Effect of land use change on vegetation carbon storage in 2005—2013 in Chongqing[J]. Journal of Northwest Forestry University,2018,33(5):75-81. (in Chinese)
- [8] BOLIN B. Changes of land biota and their importance for the carbon cycle[J]. Science,1977,196(4290):613-615.
- [9] 刘洋,张军,周冬梅,等.基于 InVEST 模型的疏勒河流域碳储量时空变化研究[J].生态学报,2021,41(10):4052-4065.  
LIU Y,ZHANG J,ZHOU D M,*et al.* Space and temporal variation of carbon reserves in Shule River basin based on InVEST model[J]. Acta Ecologica Sinica,2021,41(10):4052-4065. (in Chinese)
- [10] 王耕,王佳雯.丹东沿海地区土地利用变化对生境质量的影响研究[J].生态环境学报,2021,30(3):621-630.
- [11] 曲琛,李文,徐嘉,等.黑龙江黑土地保护利用对碳储量的潜在影响[J].西北林学院学报,2023,38(5):194-203.  
QU C,LI W,XU J,*et al.* Potential impacts of black land conservation and utilization on carbon storage in Heilongjiang Province[J]. Journal of Northwest Forestry University,2023,38(5):194-203. (in Chinese)
- [12] 侯瑞萍,夏朝宗,陈健,等.长江经济带林地和其他生物质碳储量及碳汇量研究[J].生态学报,2022,42(23):1-16.  
HOU R P,XIA C Z,CHEN J,*et al.* Carbon storage and carbon sink of forest land and other biomass in the Yangtze River Economic Belt[J]. Acta Ecologica Sinica,2022,42(23):1-16. (in Chinese)
- [13] ZHU E Y,DENG J S,ZHOU M M,*et al.* Carbon emissions induced by land-use and land-cover change from 1970 to 2010 in Zhejiang, China[J]. Science of the Total Environment,2019,646:930-939.
- [14] XIANG M S,WANG C J,TAN Y X,*et al.* Spatio-temporal evolution and driving factors of carbon storage in the Western Sichuan Plateau[J]. Scientific Reports,2022,12(1):8114.
- [15] 林彤,杨木壮,吴大放,等.基于 InVEST-PLUS 模型的碳储量空间关联性及其预测——以广东省为例[J].中国环境科学,2022,42(10):4827-4839.  
LIN T,YANG M Z,WU D F,*et al.* Spatial correlation and prediction of land use carbon storage based on the InVEST-PLUS model-A case study in Guangdong Province[J]. China Environmental Science,2022,42(10):4827-4839. (in Chinese)
- [16] 刘晓娟,黎夏,梁迅,等.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.
- [17] 邓岳,丁文广,蒲晓婷,等.基于 InVEST 模型的祁连山国家公园碳储量时空分布研究[J].水土保持通报,2022,42(3):324-334.  
DENG Z,DING W G,PU X T,*et al.* Spatial-temporal distribution of carbon storage in Qilian Mountain national park based on InVEST model[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2022,42(3):324-334. (in Chinese)
- [18] 孔雪松,陈俊励,王静,等.耦合土地利用格局与过程变化的生态干扰评价——以长三角地区为例[J].地理科学,2021,41(11):2031-2041.  
KONG X S,CHEN J L,WANG J,*et al.* Evaluation of ecological disturbance coupling land use pattern and process change: taking the Yangtze River Delta as an example[J]. Scientia Geographica Sinica,2021,41(11):2031-2041. (in Chinese)
- [19] 李明军,杜明凤,喻理飞.贵州省森林植被碳储量、碳密度及其分布[J].西北林学院学报,2016,31(1):48-54.  
LI M J,DU M F,YU L F. Carbon storage and density of forest vegetation and its spatial distribution pattern in Guizhou Province[J]. Journal of Northwest Forestry University,2016,31(1):48-54. (in Chinese)



- rates of 13 temperate tree species in relation to wood properties, enzyme activities and organismic diversities[J]. *Forest Ecology and Management*, 2017, 391: 86-95.
- [65] PEARCE R B. Antimicrobial defences in the wood of living trees[J]. *New Phytologist*, 1996, 132(2): 203-233.
- [66] WEEDON J T, CORNWELL W K, CORNELISSEN J H, *et al.* Global meta-analysis of wood decomposition rates: a role for trait variation among tree species[J]. *Ecol. Lett.*, 2009, 12(1): 45-56.
- [67] HU Z, MICHALETZ S T, JOHNSON D J, *et al.* Traits drive global wood decomposition rates more than climate[J]. *Glob. Chang. Biol.*, 2018, 24(11): 5259-5269.
- [68] LIN L, SONG Y B, LI Y, *et al.* Considering inner and outer bark as distinctive tissues helps to disentangle the effects of bark traits on decomposition[J]. *Journal of Ecology*, 2022, 110(10): 2359-2373.
- [69] DOSSA G G O, SCHAEFER D, ZHANG J L, *et al.* The cover uncovered: bark control over wood decomposition[J]. *Journal of Ecology*, 2018, 106(6): 2147-2160.
- [70] PAINE C E T, STAHL C, COURTOISE A, *et al.* Functional explanations for variation in bark thickness in tropical rain forest trees[J]. *Functional Ecology*, 2010, 24(6): 1202-1210.
- [71] ZUO J, FONCK M, VANHAL J, *et al.* Diversity of macro-detritivores in dead wood is influenced by tree species, decay stage and environment[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 78: 288-297.
- [72] FERRENBERG S, MITTON J B, JONES H. Smooth bark surfaces can defend trees against insect attack: resurrecting a 'slippery' hypothesis[J]. *Functional Ecology*, 2014, 28(4): 837-845.
- [73] JONES J M, HEATH K D, FERRER A, *et al.* Habitat-specific effects of bark on wood decomposition: Influences of fragmentation, nitrogen concentration and microbial community composition[J]. *Functional Ecology*, 2020, 34(5): 1123-1133.
- [74] ZUO J, BERG M P, KLEIN R, *et al.* Faunal community consequence of interspecific bark trait dissimilarity in early-stage decomposing logs[J]. *Functional Ecology*, 2016, 30(12): 1957-1966.
- [75] SUGANO J, MAINA N, WALLENIUS J, *et al.* Enhanced lignocellulolytic enzyme activities on hardwood and softwood during interspecific interactions of white- and Brown-Rot Fungi[J]. *Journal of Fungi*, 2021, 7(4): 265.
- [76] MOLL J, KELLNER H, LEONHARDT S, *et al.* Bacteria inhabiting deadwood of 13 tree species are heterogeneously distributed between sapwood and heartwood[J]. *Environ Microbiol.*, 2018, 20(10): 3744-3756.
- [77] GIERLINGER N, JACQUES D, WIMMER R, *et al.* Heartwood extractives and lignin content of different larch species (*Larix* sp.) and relationships to brown-rot decay-resistance[J]. *Trees-Structure and Function*, 2004, 18(2): 230-236.

#### (上接第 192 页)

- [20] 王超越, 郭先华, 郭莉, 等. 基于 FLUS-In VEST 的西北地区土地利用变化及其对碳储量的影响——以呼包鄂榆城市群为例[J]. *生态环境学报*, 2022, 31(8): 1667-1679.
- WANG C Y, GUO X H, GUO L, *et al.* Land use change and its impact on carbon storage in northwest China based on FLUS-InVEST: a case study of Hu-Bao-Er-Yu urban agglomeration[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2022, 31(8): 1667-1679. (in Chinese)
- [21] ZHU W B, ZHANG J J, CUI Y P, *et al.* Ecosystem carbon storage under different scenarios of land use change in Qihe catchment, China[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2020, 30(9): 1507-1522.
- [22] 邹文涛, 何友均, 叶兵, 等. 基于 InVEST 模型的钱江源国家公园生态系统碳储量研究[J]. *中南林业科技大学学报*, 2021, 41(3): 120-128.
- ZOU W T, HE Y J, YE B, *et al.* Study on carbon storage of ecosystem in Qianjiangyuan national park based on InVEST model[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2021, 41(3): 120-128. (in Chinese)
- [23] 李默然, 丁贵杰. 贵州黔东南主要森林类型碳储量研究[J]. *中南林业科技大学学报*, 2013, 33(7): 119-124.
- [24] 罗怀良, 袁道先, 陈浩. 南川市三泉镇岩溶区农田生态系统有机碳密度[J]. *生态环境*, 2008, 17(5): 2014-2018.
- [25] 黄从红. 基于 InVEST 模型的生态系统服务功能研究——以四川宝兴县和北京门头沟为例[D]. 北京: 北京林业大学, 2014: 28-29.
- [26] 李义平. 基于地表覆被变化的黔东南碳储量时空动态变化研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2020: 40-42.
- [27] 解宪丽, 孙波, 周慧珍, 等. 中国土壤有机碳密度和储量的估算与空间分布分析[J]. *土壤学报*, 2004, 41(1): 35-43.
- [28] 李克让, 王绍强, 曹明奎. 中国植被和土壤碳储量[J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2003(1): 72-80.
- [29] 王佳楠, 张志. 基于 Markov-PLUS 模型的柴北缘土地利用变化及模拟分析[J]. *西北林学院学报*, 2022, 37(3): 139-148.
- WANG J N, ZHANG Z. Land use change and simulation analysis in the northern margin of the qaidam basin based on Markov-PLUS model[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2022, 37(3): 139-148. (in Chinese)
- [30] 杨桦, 彭小瑜, 杨淑琪, 等. 滇南喀斯特断陷盆地土地利用方式对土壤有机碳及其活性组分的影响[J]. *生态学报*, 2022, 42(17): 7105-7117.
- YANG H, PENG X Y, YANG S Q, *et al.* Effects of land use types on soil organic carbon and soil labile organic carbon in karst faulted basin of southern Yunnan[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(17): 7105-7117. (in Chinese)
- [31] 秦罗义, 白晓永, 王世杰, 等. 近 40 年来贵州高原典型区土地利用变化及驱动机制[J]. *山地学报*, 2015, 33(5): 619-628.