

福建省碳储量时空特征及其对土地利用变化的响应

司晓茜¹, 王小军^{2,3}, 林莹冰⁴, 刘光旭⁵

(1.福建师范大学 地理科学学院 碳中和未来技术学院, 福建 福州 350007;

2.中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029; 3.中国科学院大学, 北京 100049;

4.华南师范大学 地理科学学院, 广东 广州 510631; 5.赣南师范大学 地理与环境工程学院, 江西 赣州 341000)

摘要: [目的] 研究福建省生态系统碳储量及其对土地利用变化的响应, 为生态系统保护提供参考。[方法] 基于土地利用数据和碳密度数据, 运用 InVEST 模型模拟福建省 1980, 2000, 2020 年碳储量; 利用冷热点分布、转移图谱和矩阵分析碳储量和土地利用的时空特征; 最后分析碳储量对土地利用变化的响应。[结果] ①福建省碳储量整体均较高, 82.5% 以上区域的碳储量为中等以上 (>3 000 t), 主要分布在山地丘陵地区, 也是高碳储量的热点集中区; 高(热点)低(冷点)碳储量集中区转移较少; 1980—2020 年总碳储量波动略升高, 2000—2020 年不同碳储量等级彼此之间转移相对较多。②福建省土地利用/覆被以林地为主 (61.4%~62.9%), 其次是耕地 (16.9%~18.3%) 和草地 (15.2%~17.2%); 土地利用/覆被变化在 1980—2000 年较稳定, 在 2000—2020 年较剧烈。③林地、草地和耕地的总碳储量较高, 水域、建设用地和未利用地总碳储量较少; 耕地总碳储量减少, 建设用地总碳储量增加, 林地和草地有增加也有减少; 由土地利用/覆被变化导致的总碳储量转出和转入最多均为林地, 其次是草地和耕地; 总碳储量净转移为负的是林地, 其他为正, 林地转移引起的碳亏损最多。[结论] 耕地、林地和草地是福建省的主要土地利用类型, 它们贡献了较高碳储量, 并相互转移引起了碳储量变化。

关键词: InVEST 模型; 碳储量; 时空特征; 土地利用; 转移矩阵; 福建省

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)05-0355-10

中图分类号: X87, F124.5

文献参数: 司晓茜, 王小军, 林莹冰, 等. 福建省碳储量时空特征及其对土地利用变化的响应[J]. 水土保持通报, 2023, 43(5): 355-364. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.05.041; Si Xiaolian, Wang Xiaojun, Lin Yingbing, et al. Spatiotemporal characteristics of carbon storage and its response to land use changes in Fujian Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(5): 355-364.

Spatiotemporal Characteristics of Carbon Storage and Its Response to Land Use Changes in Fujian Province

Si Xiaolian¹, Wang Xiaojun^{2,3}, Lin Yingbing⁴, Liu Guangxu⁵

(1.School of Geographical Sciences, School of Carbon Neutrality Future Technology, Fujian Normal University, Fuzhou, Fujian 350007, China; 2.Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 3.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

4.School of Geography Sciences, South China Normal University, Guangzhou, Guangdong 510631, China;

5.School of Geography and Environmental Engineering, Gannan Normal University, Ganzhou, Jiangxi 341000, China)

Abstract: [Objective] The ecosystem carbon storage and its response to land use changes in Fujian Province were analysed in order to provide a reference for ecosystem protection. [Methods] Based on land use data and carbon density data, the InVEST model was used to simulate carbon storage in Fujian Province in 1980, 2000, and 2020. The spatiotemporal characteristics of carbon storage and land use were analyzed using the distribution of cold spots and hot spots, transfer maps, and a transfer matrix. The response of carbon storage to land use changes was analyzed. [Results] ① Carbon storage in Fujian Province was relatively high on the whole, and more than 82.5% of the region was above medium carbon storage (>3 000 t), mainly located in

收稿日期: 2023-02-02

修回日期: 2023-05-16

资助项目: 国家自然科学基金项目“南方丘陵红壤侵蚀退化地马尾松种群动态及其对生境变化的响应”(31971638); 广东省科技创新战略专项资金攀登计划项目(pdjh2020b0169); 江西省高校人文社会科学研究规划项目(GL20116); 江西省教育厅科技项目(GJJ201419)

第一作者: 司晓茜(1997—), 女(汉族), 甘肃省兰州市人, 硕士, 主要从事生态学研究。Email: sxq18359183775@163.com。

通信作者: 王小军(1994—), 男(汉族), 江西省赣州市人, 博士, 主要从事环境演变与资源生态等研究。Email: gwangxj@163.com。

mountainous and hilly areas, which were also hot spots of high carbon storage. Areas of high (hot spots) and low (cold spots) of carbon storage concentration transferred less. Total carbon storage fluctuated slightly from 1980 to 2020, and relatively more carbon storage transferred between different carbon storage levels from 2000 to 2020. ② Land use/cover in Fujian Province was mainly forest land (61.4%—62.9%), followed by cultivated land (16.9%—18.3%) and grassland (15.2%—17.2%). Land use/cover change was relatively stable from 1980 to 2000, and more intense from 2000 to 2020. ③ Total carbon storage values in forest land, grassland, and cultivated land were relatively high, while total carbon storage in water bodies, construction land, and unused land were relatively low. Total carbon storage in cultivated land decreased over time, while total carbon storage of construction land increased. The area of forest land and grassland both increased and decreased. The largest transfer of total carbon storage caused by land use/cover changes was observed in forest land, followed by grassland and cultivated land. The net transfer of total carbon storage was negative for forest land, and positive for the other land use classes. The largest carbon loss was observed for the transfer of forest land. [Conclusion] Cultivated land, forest land, and grassland were the main types of land use in Fujian Province contributing to higher carbon storage, and their mutual transfer resulted in carbon storage changes.

Keywords: InVEST model; carbon storage; spatiotemporal characteristics; land use; transfer matrix; Fujian Province

人类活动影响已造成大气、海洋和陆地变暖,预测至少到 21 世纪中期,全球地表温度将继续上升,这对全球生态系统、经济可持续发展产生重要影响。中国政府多次表示致力于节能减排,并提出力争于 2030 年前碳排放达到峰值、2060 年前实现碳中和的“双碳”目标,因而开展生态系统碳储量调查尤为重要。碳储量评估对于理解生态系统碳循环、减缓气候变化、绿色经济发展具有重要意义。

InVEST 模型即“生态系统服务功能与权衡交易综合评价模型”,其产出的空间化结果易于识别生态系统服务的重要领域^[1]。InVEST 模型碳储量模块基于土地利用/覆盖类型地图和 4 个碳库的碳储量来估算在当前景观下碳储量或者一个时间段内的碳固持^[2-4]。南方地区具备亚热带季风气候条件,分布了亚热带常绿阔叶林,发育了红壤、黄壤,尽管宏观自然环境差异相对较小,生态系统碳储量也存在差异,并受到不同因素的影响。不同土地利用/覆被类型碳储量存在差异,林地、草地等地类碳密度最高,故植被覆盖较高的南方地区可能拥有更高的碳储量,林地的增加可能会促进生态系统碳储量增加^[5],反之可能降低。基于 InVEST 模型研究发现,南京市过去 20 a 因城市建设用地扩张和耕地、林地、草地减少导致碳储量减少,情景分析表明需要采取耕地保护和生态保护政策^[6]。不仅是在城市,城镇化扩张侵占林地、耕地已经导致了山区碳储量减少^[7],表明土地利用变化直接影响区域碳储量高低^[8-9]。碳储量差异还体现在空间格局上,对漓江流域陆地生态系统碳储量时空特征与预测就发现,高海拔地区碳储量较高,平原地区

碳储量较低^[10]。这与不同地形地貌条件下地表覆被有关,山地多植被、平原多耕地和建设用地,进而影响碳源/碳汇格局。碳密度较高的生态空间面积减少,则可能会引起碳储量流失,相反则可能是碳汇增加^[11]。这些研究为南方地区生态系统碳储量研究提供了重要参考。几十年尺度的碳储量变化与人类活动密切相关,土地利用/覆被变化一定程度上是刻画人类活动的重要手段^[12],因此本研究考虑采用多个年代、时间跨度长,探讨生态系统碳储量对土地利用变化的响应。

福建省是东南丘陵重要的生态屏障,是落实“绿水青山就是金山银山”思想的重要实践基地,然而如何兼顾经济社会发展需求与生态环境保护要求是当前面临的重大课题,为此需要进行完备的土地利用变化与生态系统服务调查。考虑到人为活动对碳储量的影响,杉木、马尾松、千年桐等人工林的碳储量与碳库格局受到较多关注,实地采样与林间试验研究表明立地条件、林分密度、年龄、恢复年限、间隔伐木措施等因素不同程度影响了碳储量^[13-17]。除了较系统地某区域开展大量高精度和高密度采集工作^[18],以及结合 Landsat TM, SPOT5 等卫星遥感数据^[19-21],大规模林地调查也有助于了解较大范围内碳储量动态,如森林资源清查、土壤普查结果等资料,提供了福建全省或较大行政区域的不同比例尺度的碳储量与碳密度特征等结果^[22-25]。然而无论是对人工林、有机碳等的试验研究,还是遥感数据与模型估算,都受到时间与空间尺度的制约。目前较少有追溯到过去 40 a 福建全省碳储量估算的相关研究报道。基于遥感数据的土地利用/覆被分类相对成熟,已经有较长

时间序列的相关数据,便于估算碳储量,并探讨其变化对土地利用变化的响应。本研究以生态系统碳储量调查为视角,基于土地利用/覆被变化数据和碳密度,利用 InVEST 模型模拟福建省 1980,2000,2020 年碳储量,分析碳储量和土地利用时空特征,在此基础上统计不同土地利用类型的总碳储量与变化,探究总碳储量对土地利用变化的响应,以期为生态系统保护提供参考。

1 研究区概况

福建省(23°34′—28°19′N,115°51′—120°43′E)位于东南丘陵,占比超过全省面积 80% 的低山丘陵相间分布主导了主要的地貌起伏特征,素有“八山一水一分田”之称(图 1)。福建省西部绵延着武夷山与江西省为界,西南相连广东省,东北毗邻浙江省,东部间隔台湾海峡与台湾地区相望。福建省所在的华南地区是典型的亚热带季风气候^[26],来自海洋的水汽在春夏季形成丰富的降水,年降雨量约 1 500~2 000 mm,年平均气温 17~21 °C。在这种较为湿热的气候特征下,该区发育了南方红壤、黄壤,并广泛生长了亚热带常绿阔叶林。2019 年福建省森林覆盖率为 66.8%,位居全国第一,是全国六大林区之一,拥有丰富的生物资源。此外还有丰富的茶叶、油茶等人工作物^[27-29]。近年来,耕地和建设用地扩张,水域和海岸生态系统萎缩,土地利用/覆被变化影响了生态系统服务。因此,生态系统碳储量可能受到自然环境和人为活动的共同影响。

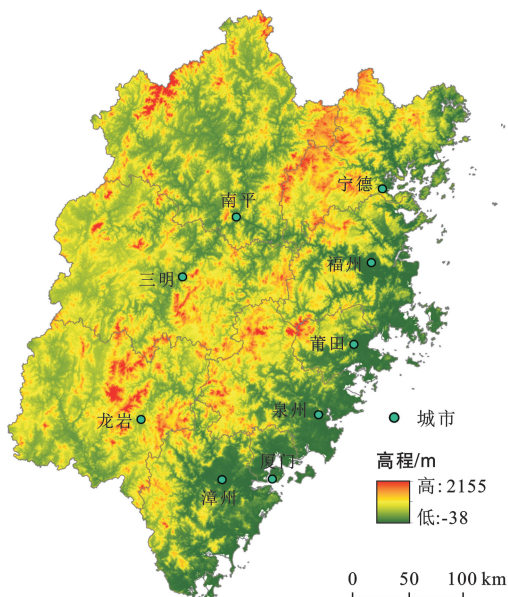


图 1 福建省地形分布

Fig.1 Topographic distribution of Fujian Province

2 资料与方法

2.1 数据来源

(1) 高程数据(DEM,100 m)。来源于 SRTM-v4.1(<http://srtm.csi.cgiar.org>),它是覆盖面积广,采集数据量大,数据精度高的数字地形高程模型。

(2) 土地利用数据(1 km)。由 1980,2000,2020 年 3 期组成,一级类分为耕地、林地、草地、水域、建设、未用 6 种类型,二级类分为 23 个类型,来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>)。主要用于估算碳储量时空特征及其对土地利用变化的响应。

(3) 碳密度数据(表 1)。土地利用/覆被碳密度是进行碳储量评估的基础。已有研究表明同一气候带土地利用类型碳密度差异较小^[30],因此本研究参考同为亚热带气候区的广东省、海南碳密度数据^[8,3],草地地下生物量还参考湖南洞庭湖地区^[31]。

表 1 福建省不同土地利用类型的碳密度

Table 1 Carbon density of different land use types in Fujian Province

代码	类型	C_{above}	C_{below}	C_{soil}	C_{dead}
11	水田	14.9	3.0	10.8	1.0
12	旱地	16.6	3.3	10.8	0.0
21	有林地	20.6	6.2	22.6	4.7
22	灌木林	19.0	5.7	19.0	2.5
23	疏林地	19.1	5.5	22.6	3.6
24	其他林地	18.3	5.5	22.6	0.5
31	高覆盖度草地	18.8	3.2	10.0	0.2
32	中覆盖度草地	18.2	3.2	10.0	0.2
33	低覆盖度草地	11.2	3.2	10.0	0.2
41	河渠	0.0	0.0	0.0	0.0
42	湖泊	0.0	0.0	0.0	0.0
43	水库坑塘	0.0	0.0	0.0	0.0
45	滩涂	0.3	1.3	3.0	1.2
46	滩地	0.3	1.3	3.0	1.2
51	城镇用地	8.7	1.7	15.8	0.0
52	农村居民点	13.5	2.7	22.2	0.0
53	其他建设用地	11.7	2.3	15.8	0.0
65	裸土地	10.0	3.9	0.8	0.0
66	裸岩石质地	0.0	0.0	0.0	0.0

注: C_{above} 为地上生物量碳密度(t/hm^2); C_{below} 为地下生物量碳密度; C_{soil} 为土壤有机质碳密度; C_{dead} 为死亡生物量碳密度。

2.2 碳储量估算与时空特征

InVEST 模型(<https://naturalcapitalproject.stanford.edu/software/invest>)的碳储量模块可用于估算地上生物量、地下生物量、土壤有机质和死亡掉

落物有机质等 4 种常见的基本碳库^[2-4],该方法采用不同土地利用类型下不同凋落物碳密度数据估算生态系统碳储量,即碳库代替法,计算公式为:

$$C_{\text{total}} = \sum_{i=1}^n [(C_{i_above} + C_{i_below} + C_{i_soil} + C_{i_dead}) \times S_i] \quad (1)$$

式中: C_{total} 为总碳储量(t); i 为第 i 种土地利用类型; n 为土地利用类型的数量,本研究取值为6; C_{above} 为地上生物量碳密度(t/hm^2); C_{below} 为地下生物量碳密度; C_{soil} 为土壤有机质碳密度; C_{dead} 为死亡生物量碳密度; S_i 为第 i 类土地利用类型的总面积(hm^2)。碳密度数据见表1。

将 InVEST 模型输出的碳储量结果导入 ArcGIS 10.2 即可获得碳储量空间分布格局。并利用空间统计工具中的 Getis-Ord G_i^* 功能分析碳储量冷热点分布,探讨高低碳储量分布的集中特征。此外还利用重分类功能参考自然间断法将 1980,2000,2020 年碳储量分为低(0~1 500 t)、较低(1 500~3 000 t)、中等(3 000~3 800 t)、较高(3 800~5 000 t)和高(>5 000 t)5 个等级,利用栅格计算器将新老两期碳储量相减获得碳储量空间变化格局。

2.3 土地利用转移图谱与转移矩阵

地学信息图谱是借助 GIS 等工具将土地利用转移信息可视化的一种方法,揭示了土地利用变化的时空特征,计算方法为:

$$Z = 10X + Y \quad (2)$$

式中: Z 为土地利用转移代码,前后两位代码值分别表示前后研究期土地利用类型; X 和 Y 分别为研究初期和末期的土地利用代码。

土地利用转移矩阵用矩阵的方式反映了不同时期土地利用类型的面积变化结果,计算公式如下:

$$S = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ S_{n1} & S_{n2} & \cdots & S_{nn} \end{pmatrix} \quad (3)$$

式中: S 为面积; n 为土地利用的类型数; i 和 j 分别为研究初期与末期的土地利用类型。此外本研究还利用该转移矩阵分析碳储量转移。

3 结果与分析

3.1 碳储量时空特征

3.1.1 碳储量分布特征 1980—2020 年福建省碳储量整体均较高,中等以上(>3 000 t)比例达 82.5%~83.4%,主要分布在山地丘陵地区,沿海和河流地区相对较低(图 2a—2c)。低碳储量面积最小,占 1.4%~1.6%;较低、中等和较高碳储量面积也相对较小,

比例分别为 15.3%~15.9%,19.3%~20.7%和 9%~10.4%;高碳储量面积最大,比例 52.8%~55.4%。近 40 a 碳储量的空间格局较为稳定,表明研究期内福建省生态系统碳储量分布的基本格局变化较小。该特征可能与省域土地利用/覆被变化较小有关,数据分辨率较大有关,因为省域面积较大、数据分辨率较大可能会忽略较小碳储量变化信息。

碳储量冷热点分布呈团块状,热点区多在内陆山地丘陵,是高碳储量集中区域,冷点区多在沿海,是低碳储量集中区域(图 2d—2f)。1980,2000,2020 年碳储量冷热点都较为集中,且有越来越集中的趋势,说明低碳储量和高碳储量分布存在较明显的区别。高碳储量的热点区域植被覆盖较好,碳储量较高且较集中。低碳储量的冷点区域河流较多,地势低平,较多耕地和建设用地,一定程度上体现了人类活动对碳储量分布的影响。

3.1.2 碳储量变化特征 1980—2020 年福建省碳储量表现出减少且空间复杂化的变化特征(图 3a—3c)。1980—2000 年有 95%的区域是稳定,碳储量变化不明显;2000—2020,1980—2020 年则表现为碳储量稳定区缩小(78.4%~79.8%),减少和升高区扩大(分别占 10%~11.2%,9.6%~9.7%)。1980—2020 年总碳储量呈波动略升高的趋势。不同等级碳储量面积变化存在差异,中碳储量面积逐渐减小(由 20.7%降至 19.3%),其他类的面积呈波动变化。

碳储量等级转移在空间上表现为高、低碳储量集中区转移较少,过渡区转移较多;在时间上呈阶段性变化特征,1980—2000 年转移较少,2000—2020 年不同碳储量等级彼此之间转移相对较多(图 3d—3e,表 2)。1980—2000 年,每种等级转移均是不变的面积最大,其次是等级跨度较小的转移面积较大,等级跨度越大,转移面积越小。碳储量跨等级转移中,高碳储量转移为中碳储量(585 km^2)的面积相对较大。不同于 1980—2000,2000—2020 年碳储量转移面积最大的类别除了不变类,还出现了中等碳储量向高碳储量转移的面积大于中等无变化的面积、较高碳储量向高碳储量转移的面积大于高碳储量无变化的面积等现象,表明 2000 年以后的碳储量波动更明显。该时期跨等级转移更剧烈,碳储量较低转移为中等(3 004 km^2)、较高(1 930 km^2)和高(6 105 km^2),中等转移为较低(3 414 km^2)、较高(2 096 km^2)和高(9 845 km^2),较高转移为较低(1 740 km^2)、中等(1 722 km^2)和高(3 671 km^2),以及高转移为较低(6 777 km^2)、中等(10 458 km^2)和较高(5 526 km^2)的面积较大。

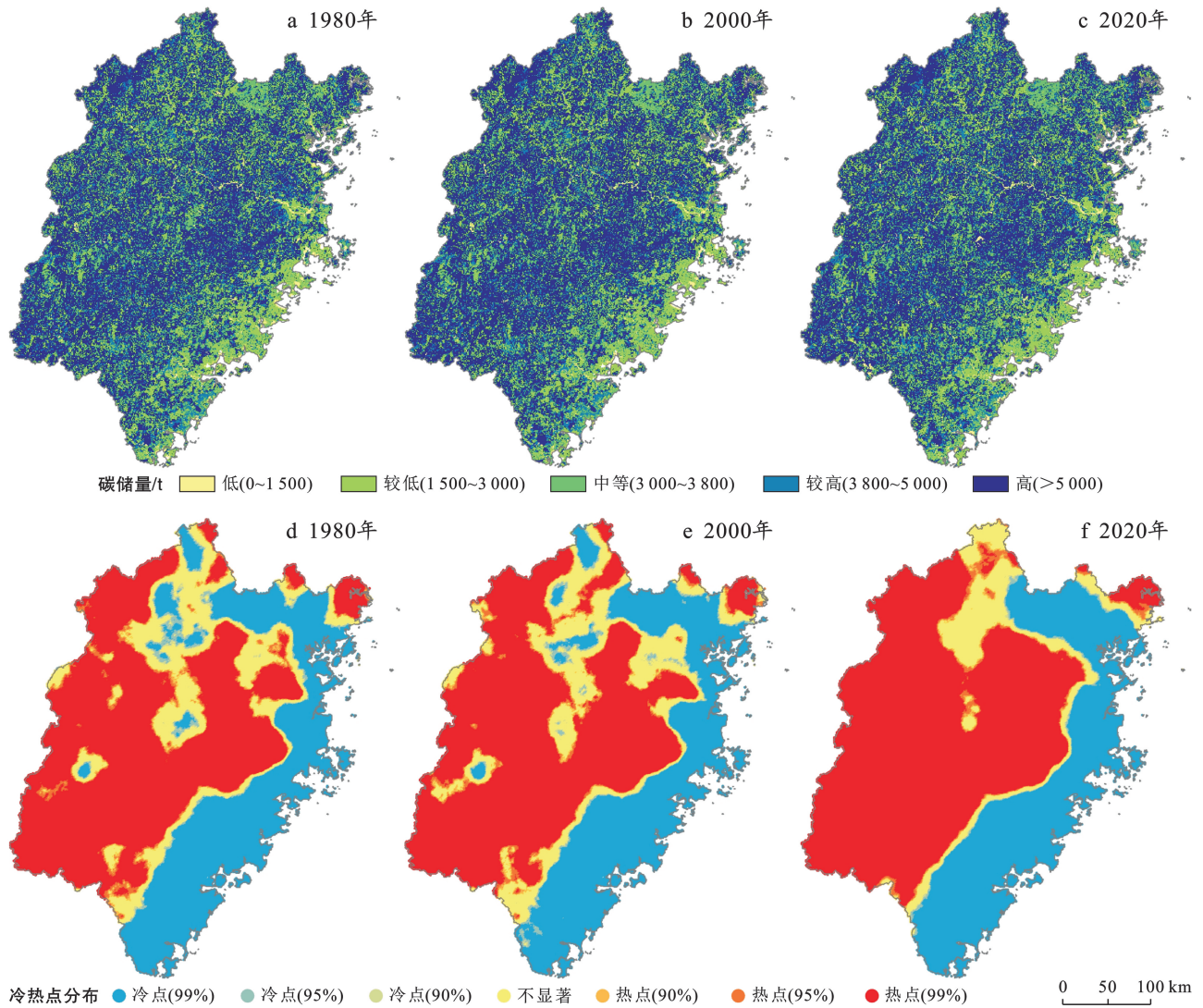


图 2 1980—2020 年福建省碳储量分布特征

Fig.2 Distribution characteristics of carbon storage in Fujian Province from 1980 to 2020

表 2 1980—2020 年福建省碳储量面积转移矩阵

Table 2 Stochastic matrix of carbon storage area in Fujian Province from 1980 to 2020

km²

类型	1980—2000 年面积					2000—2020 年面积				
	低	较低	中等	较高	高	低	较低	中等	较高	高
低	1 589	257	14	6	30	450	440	213	130	363
较低	80	18 400	235	152	627	531	7 629	3 004	1 930	6 105
中等	20	225	23 421	218	2 406	252	3 414	8 917	2 096	9 845
较高	7	173	444	10 113	700	139	1 740	1 722	3 384	3 671
高	21	284	585	249	66 509	489	6 777	10 458	5 526	46 705

3.2 土地利用时空特征

3.2.1 土地利用分布特征 1980—2020 年福建省土地利用/覆被以林地为主(61.4%~62.9%),分布广泛;耕地(16.9%~18.3%)和草地(15.2%~17.2%)其次,呈杂乱分布;水域(1.3%~1.5%)、建设用地(1.6%~4.4%)和未利用地(0.1%)面积较小,主要分布在沿河沿海等地势低平地区(图 4a—4c)。福建省土地利用/覆被结构与分布反映了南方丘陵地区自然环境背景特征对其的影响,即植被覆盖较多,林地、草

地面积广,耕地面积有限且受地形地貌限制。部分耕地分散布局在北部,较多分布在沿海地区,且建设用地也集中在河流沿岸、沿海地区,这些地方是碳储量较低、变化较为频繁的区域。

3.2.2 土地利用变化特征 不同土地利用类型面积变化存在差异,耕地和草地面积逐渐减小(分别由 18.3%减至 16.9%,由 17.2%减至 15.2%),建设用地面积增加(由 1.6%增至 4.4%),林地和水域面积呈波动变化(图 4a—4c)。

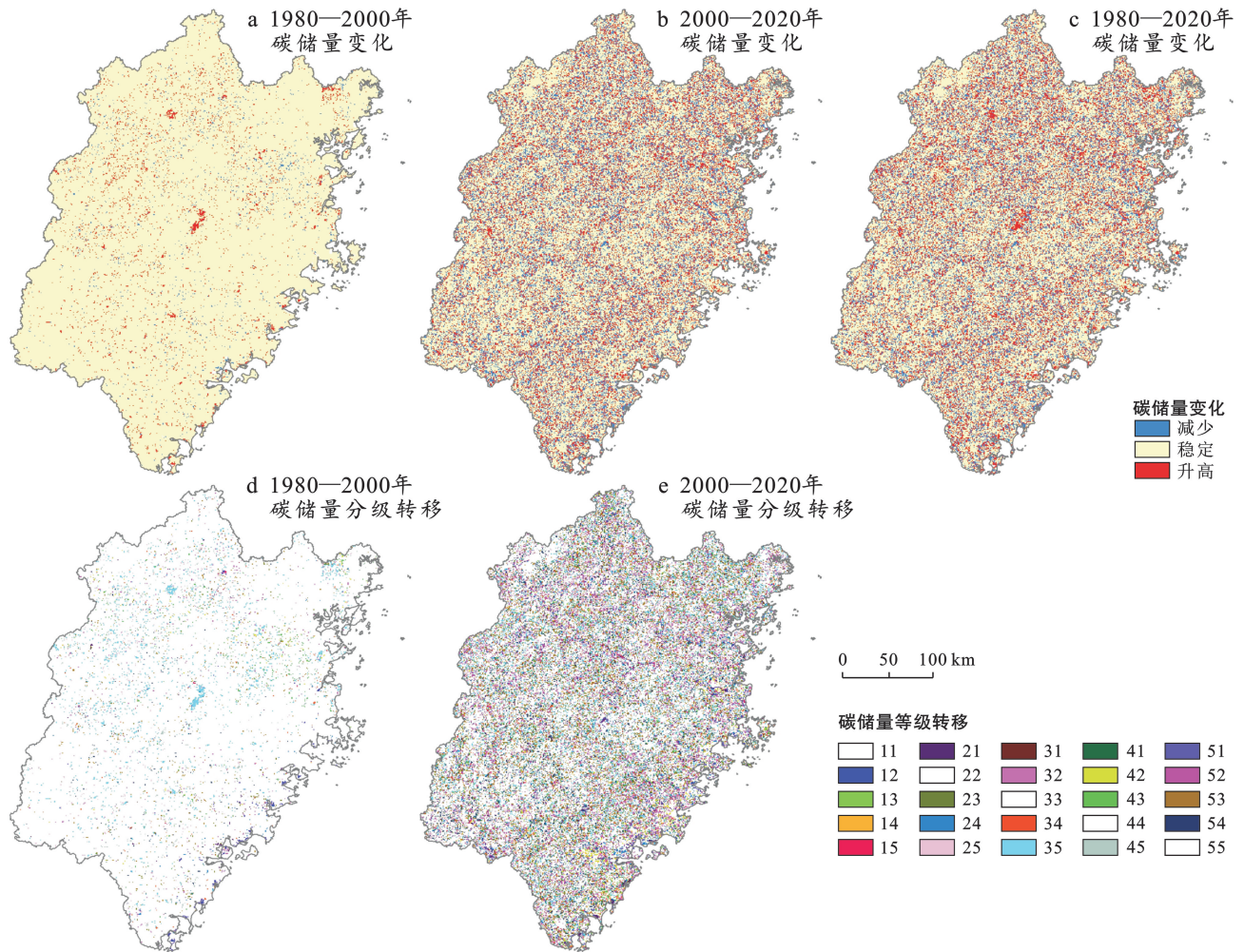


图 3 1980—2020 年福建省碳储量变化特征

Fig.3 Characteristics of carbon storage changes in Fujian Province from 1980 to 2020

土地利用转移在 2000 年前后呈不同特征, 1980—2000 年土地利用/覆被变化较稳定, 2000—2020 年较剧烈(图 4d—4e, 表 3)。1980—2000 年, 转移图谱和矩阵均表现出林地主导且稳定, 地类交界处有少量转移的变化特征; 各地类转移面积最大均为不变区域的面积; 地类间转移面积较大的是林地转移为草地(1 158 km²)和草地转移为林地(3 003 km²)。2000—2020 年, 6 种地类不变的区域均显著减小, 尤

其表现在林地空间分布中; 此外耕地、草地和水域不变的面积小于它们转出的面积。

地类间转移面积较大的是耕地转移为林地(9 255 km²)、耕地转移为草地(2 638 km²)、耕地转移为建设用地(2 236 km²)、林地转移为耕地(9 387 km²)、林地转移为草地(9 414 km²)、林地转移为建设用地(1 408 km²)、草地转移为耕地(2 575 km²)、草地转移为林地(9 549 km²)等。

表 3 1980—2020 年福建省土地利用面积转移矩阵

Table 3 Stochastic matrix of land use area in Fujian Province from 1980 to 2020

类型	1980—2000 年面积						2000—2020 年面积						km ²
	耕地	林地	草地	水域	建设	未用	耕地	林地	草地	水域	建设	未用	
耕地	22 452	281	45	73	366	0	8 321	9 255	2 638	470	2 236	11	
林地	298	76 348	1 158	15	47	13	9 387	58 517	9 414	531	1 408	50	
草地	214	3 003	18 507	11	22	11	2 575	9 549	6 781	154	500	14	
水域	91	7	6	1 533	164	0	298	400	138	431	251	0	
建设	13	17	4	5	1 966	0	734	440	151	181	1 017	0	
未用	3	25	9	0	2	56	9	36	13	1	1	18	

3.3 碳储量对土地利用变化的响应

3.3.1 不同土地利用类型总碳储量 不同土地利用类型总碳储量分布存在差异,林地、草地和耕地的总碳储量较高,水域、建设用地和未利用地总碳储量较少(图 5a)。有林地总碳储量最高($2.88 \times 10^8 \sim 3.05 \times 10^8$ t),其次是疏林地($6.97 \times 10^7 \sim 7.19 \times 10^7$ t),然后是水田($4.27 \times 10^7 \sim 4.71 \times 10^7$ t)、高覆盖草地($3.6 \times 10^7 \sim 3.67 \times 10^7$ t)和灌木林($3.2 \times 10^7 \sim 3.61 \times 10^7$ t),其他土地利用/覆被类型总碳储量较低(低于 3×10^7 t)。

不同土地利用类型总碳储量变化也存在差异,耕

地总碳储量减少,建设用地总碳储量增加,林地和草地有增加也有减少(图 5b)。有林地碳储量在 1980—2000,2000—2020 年增加(1.59×10^7 t)和减少(1.67×10^7 t)最多;其他林地在 2000—2020 年增加(9.11×10^6 t)较多。总碳储量高低与土地利用/覆被类型的面积大小和碳密度高低有关。福建省林地、草地的面积较大、碳密度较高,因而这两类土地利用/覆被类型贡献了较高的总碳储量较高,而水域、建设用地和未利用地等则相反,对总碳储量贡献较低。这也导致了总碳储量能更为敏感响应林地、草地变化,尤其是有林地、其他林地和中覆盖草地。

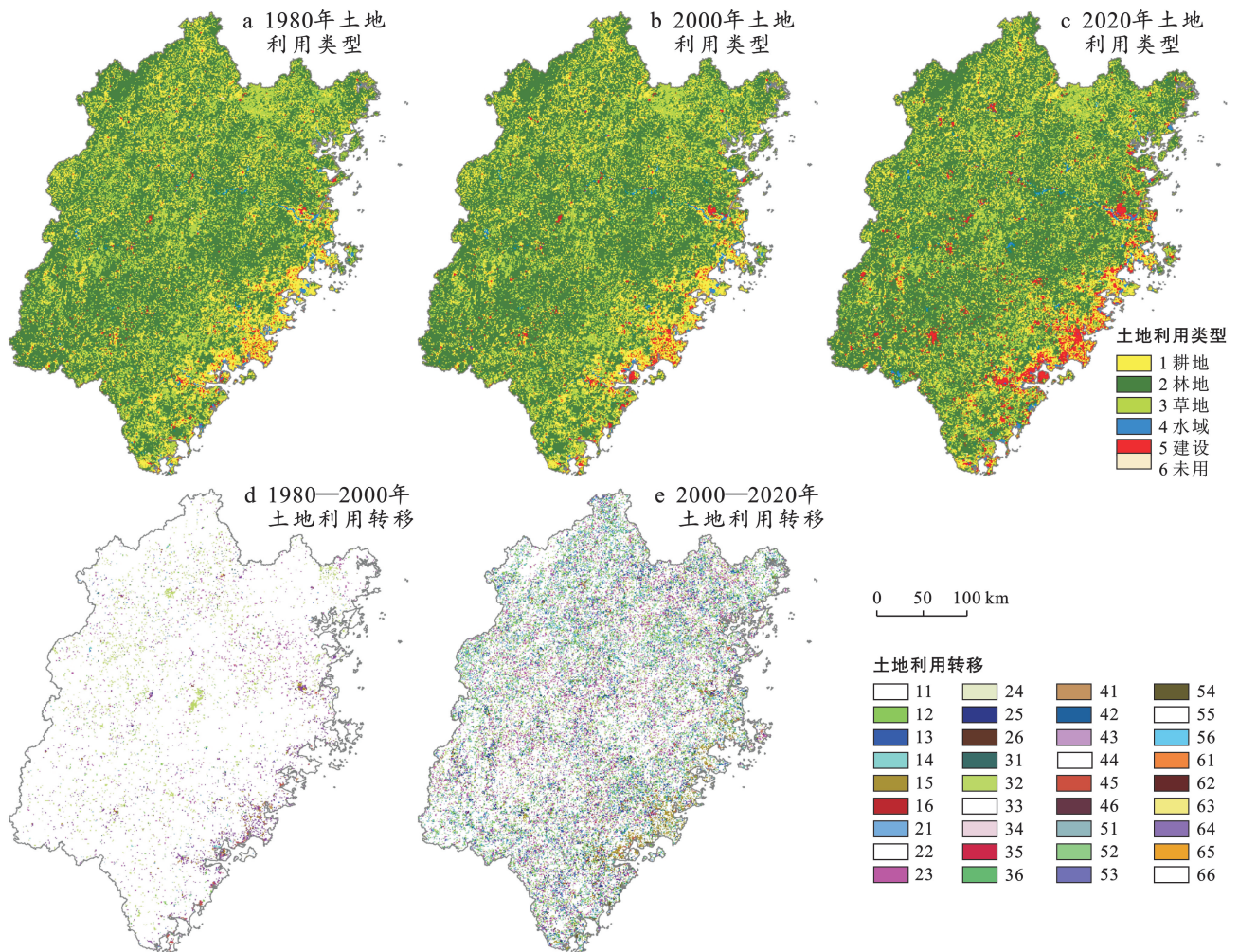


图 4 1980—2020 年福建省土地利用分布与变化特征

Fig.4 Distribution and change characteristics of land use in Fujian Province from 1980 to 2020

3.3.2 土地利用与总碳储量转移 由土地利用/覆被变化导致的总碳储量转出最多为林地、其次是草地和耕地(图 6a)。

水田总碳储量转出至有林地(9.06×10^6 t)、疏林地(2.57×10^6 t)较多,旱地总碳储量转出至有林地(4.98×10^6 t)、疏林地(1.41×10^6 t)较多,有林地总碳储量转出至水田(9.10×10^6 t)、旱地(5.17×10^6 t)、灌木林(1.80×10^6 t)、高覆盖草地(7.78×10^6 t)、中覆盖

草地(3.99×10^6 t)和低覆盖草地(1.68×10^6 t)较多,灌木林总碳储量转出至有林地较多(2.08×10^6 t)较多,疏林地总碳储量转出至水田(2.63×10^6 t)、高覆盖草地(2.32×10^6 t)较多,高覆盖草地总碳储量转出至有林地(7.91×10^6 t)、疏林地(2.18×10^6 t)较多,中覆盖草地总碳储量转出至有林地(5.87×10^6 t)较多,中覆盖草地总碳储量转出至有林地(2.98×10^6 t)较多。

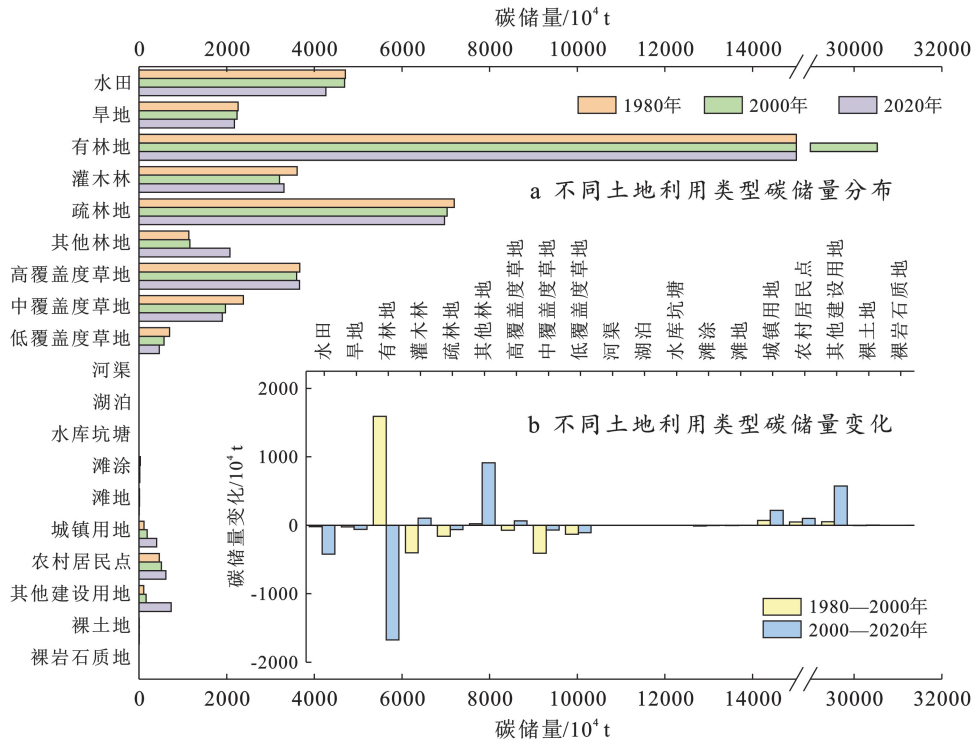


图 5 不同土地利用类型碳储量差异

Fig.5 Differences in carbon storage among different land use types

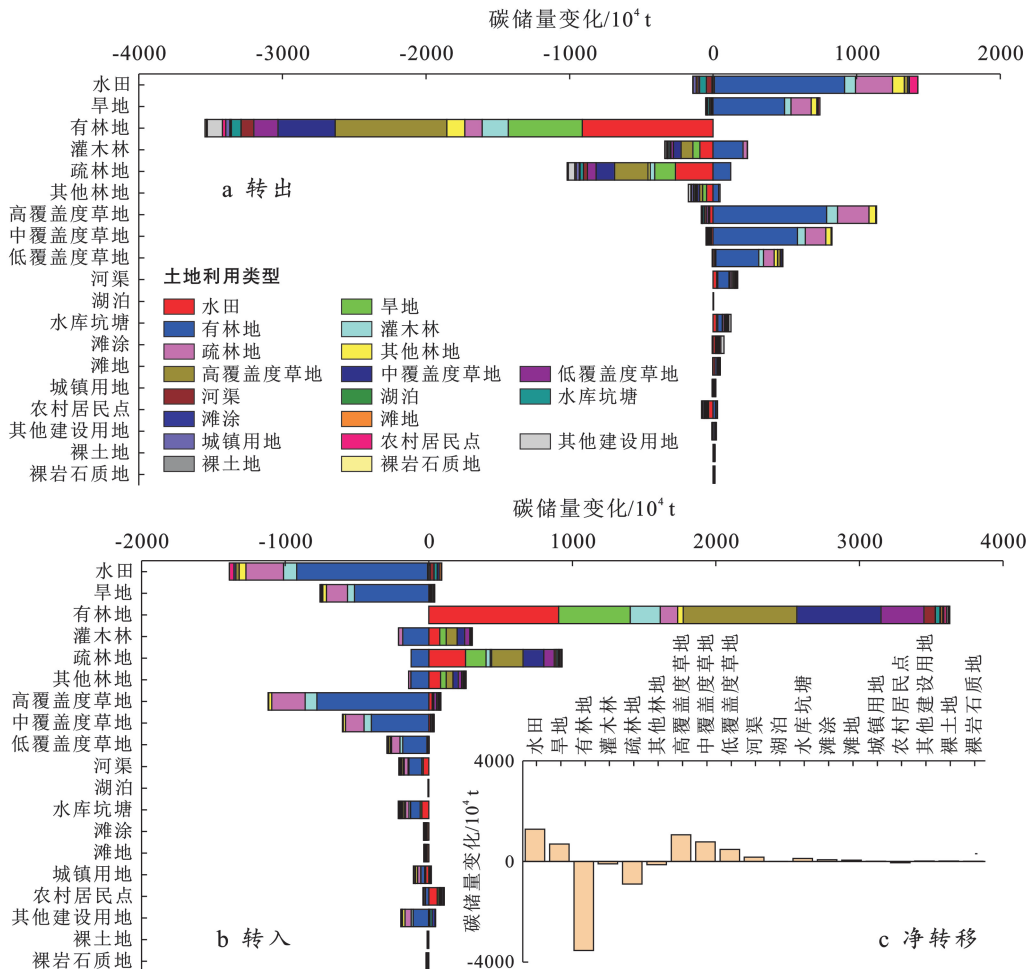


图 6 1980—2020 年福建省碳储量面积转移

Fig.6 Carbon storage area transfer in Fujian Province from 1980 to 2020

由土地利用/覆被变化导致的总碳储量转入仍然最多为林地、其次是草地和耕地(图 6b)。转入至水田总碳储量较多的是有林地(9.10×10^6 t)、疏林地(2.63×10^6 t),转入至旱地总碳储量较多的是有林地(5.17×10^6 t)、疏林地(1.45×10^6 t),转入至有林地总碳储量较多的有水田(9.06×10^6 t)、旱地(4.98×10^6 t)、灌木林(2.08×10^6 t)、高覆盖草地(7.91×10^6 t)、中覆盖草地(5.87×10^6 t)、低覆盖草地(2.98×10^6 t),转入至灌木林总碳储量较多的是有林地(1.80×10^6 t),转入至疏林地总碳储量较多的有水田(2.57×10^6 t)、高覆盖草地(2.19×10^6 t),转入至高覆盖草地总碳储量较多的是有林地(7.78×10^6 t)、疏林地(2.32×10^6 t),转入至中覆盖草地总碳储量较多的是有林地(3.99×10^6 t),转入至低覆盖草地总碳储量较多的是有林地(1.68×10^6 t)。

由土地利用/覆被变化导致的总碳储量净转移为负的是林地,其他为正(图 6c)。有林地总碳储量净转移亏损最大(-3.54×10^7 t),其次为疏林地(-8.973×10^6 t);总碳储量净转移盈余较大的有水田(1.28×10^7 t)、旱地(6.9×10^6 t)、高覆盖草地(1.06×10^7 t)、中覆盖草地(4.8×10^6 t)。

土地利用/覆被变化,尤其是耕地、林地和草地之间的相互转移明显影响了总碳储量转移。福建省耕地、林地和草地面积较大,且较少转移到水域、建设用地和未利用地,此外这几类土地利用类型的碳密度均较高,因而它们之间的转移没有显著导致总碳储量升高或降低。

4 讨论与结论

4.1 讨论

福建省碳储量总体较高,但在 1980—2020 年呈逐渐降低趋势。此期间,福建省人口由 2.50×10^7 人增加到 4.20×10^7 人,GDP 由 0.01×10^{12} 元增加到 4.36×10^{12} 元,建设用地面积由 $2\ 005$ km^2 (1.6%) 扩大到 $5\ 592$ km^2 (4.4%),而耕地面积由 $23\ 220$ km^2 (18.3%) 缩小到 $21\ 455$ km^2 (16.9%),草地面积也由 $21\ 769$ km^2 (17.2%) 缩小到 $19\ 277$ km^2 (15.2%)。人口和经济增长加大了对环境的开发,土地利用/覆被变化显著体现了这种影响过程,福建省建设用地与其他用地的协调与权衡也体现了这种关系,并影响碳储量。

当前中国社会经济快速发展,城市建设用地迅速扩张导致碳储量下降,这种变化趋势也体现在其他区域,如南方的广州市^[32]、广东省^[8]、桂林市^[33]、漓江流域^[10]、海南岛海岸带和中部山区^[3,7]、江苏江阴

市^[34]、南京市^[6]、安徽省等^[35],以及北方的辽宁省^[36]、北京市^[37]、邯郸市^[38]、太原市等^[39]。然而西北的部分区域也有碳储量逐渐增加的趋势,如甘肃省^[40]、西北干旱区^[41]、黄土丘陵沟壑区等^[42]。碳储量变化的原因是多方面的,东部地区碳储量减少,主要是由于耕地、林地减少和建设用地的增加。耕地、林地和建设用地存在竞争关系,人口增加、城市地域扩张,在现有的社会经济发展背景下,牺牲了一部分生态系统服务,这反映了人类活动对生态系统的不良影响。福建省碳储量变化对土地利用/覆被变化的响应特征,与东部城市扩张明显地区的碳储量较为一致,但不同于部分西部地区的碳储量变化。西部地区生态环境本身较为脆弱,近些年国家政策更加注重生态环境保护,退耕还林还草工程、治沙工程等的实施,促使西北地区生态环境一定程度上趋于好转,进而使碳储量增加,这反映了人为干预对生态系统的有利作用。因此在生态环境保护背景下开展城市建设,合理规划用地、合理分配土地资源尤为重要。

4.2 结论

(1) 福建省碳储量整体均较高,中等碳储量主要分布在山地丘陵地区。碳储量冷热点分布呈团块状,高碳储量的热点区多集中在内陆山地丘陵。

(2) 1980—2020 年福建省总碳储量呈波动略升高趋势。空间上,高低碳储量集中区转移较少,过渡区转移较多;时间上,1980—2000 年转移较少,2000—2020 年不同碳储量等级彼此之间转移相对较多。

(3) 福建省土地利用/覆被以林地为主,耕地和草地其次。1980—2000 年土地利用/覆被变化较稳定;2000—2020 年土地利用/覆被变化较剧烈,各类不变区域的面积均显著减小。

(4) 林地、草地和耕地的总碳储量较高;耕地总碳储量减少,建设用地总碳储量增加。由土地利用/覆被变化导致的总碳储量转出和转入最多均为林地、其次是草地和耕地;总碳储量净转移为负的是林地,碳亏损最多,其他土地利用/覆被变化引起的总碳储量净转移为正。

(5) 碳储量与土地利用/覆被分布变化和碳密度有关,尤其是林地和草地,面积较大、碳密度较高。耕地、林地和草地是福建省主要土地利用类型,它们之间相互转移,引起了碳储量分布变化。

[参 考 文 献]

- [1] Wang Xiaojun, Liu Guangxu, Lin Durui, et al. Water yield service influence by climate and land use change

- based on InVEST model in the monsoon hilly watershed in South China [J]. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2022, 13(1):2024-2048.
- [2] Sharp R, Tallis H T, Ricketts T, et al. InVEST 3.2.0 User's Guide [EB/OL]. The Natural Capital Project, Stanford University, University of Minnesota, The Nature Conservancy, and World Wildlife Fund. 2015. <https://storage.googleapis.com/releases.naturalcapitalproject.org/invest-userguide/latest/index.html>.
- [3] 段璇瑜, 龚文峰, 孙雨欣, 等. 海南岛海岸带土地利用变化及其对碳储量时空演变的影响[J]. *水土保持通报*, 2022, 42(5):301-311.
- [4] 邓喆, 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, 396.
- [5] 丁岳, 王柳柱, 桂峰, 等. 基于 InVEST 模型和 PLUS 模型的环杭州湾生态系统碳储量[J]. *环境科学*, 2022, 44(6):3343-3352.
- [6] 孙欣欣, 薛建辉, 董丽娜. 基于 PLUS 模型和 InVEST 模型的南京市生态系统碳储量时空变化与预测[J]. *生态与农村环境学报*, 2023, 39(1):41-51.
- [7] 张育诚, 韩念龙, 胡珂, 等. 海南岛中部山区土地利用变化对碳储量时空分异的影响[J]. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2023, 47(2):115-122.
- [8] 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预测: 以广东省为例[J]. *中国环境科学*, 2022, 42(10):4827-4839.
- [9] 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.
- [10] 魏玺, 邵亚, 蔡湘文, 等. 漓江流域陆地生态系统碳储量时空特征与预测[J]. *环境工程技术学报*, 2023, 13(3):1223-1233.
- [11] 赵胤程, 覃盟琳, 庞雅月, 等. 基于 FLUS-InVEST 模型的北部湾城市群生态空间碳汇演变模拟及驱动因素研究[J]. *水土保持通报*, 2022, 42(3):345-355.
- [12] 王小军, 张楚然, 廖倚凌, 等. 1980—2018 年粤港澳大湾区人为干扰度的时空特征[J]. *水土保持通报*, 2021, 41(3):333-341.
- [13] 向玉国, 郑小贤, 刘波云, 等. 福建将乐林场杉木碳储量密度控制图的编制[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2014, 42(8):99-104.
- [14] 涂宏涛, 孙玉军, 刘素真, 等. 亚热带杉木人工林生物量及其碳储量分布: 以福建将乐县杉木人工林为例[J]. *中南林业科技大学学报*, 2015, 35(7):94-99.
- [15] 刘政, 许文斌, 田地, 等. 南方红壤严重侵蚀地不同恢复年限马尾松人工林生态系统碳储量特征[J]. *水土保持通报*, 2019, 39(1):37-42.
- [16] 洪滔, 何晨阳, 黄贝佳, 等. 不同林龄千年桐人工林的碳含量和碳储量及碳库分配格局[J]. *植物资源与环境学报*, 2021, 30(1):9-16.
- [17] 王有良, 林开敏, 宋重升, 等. 间伐对杉木人工林生态系统碳储量的短期影响[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2022, 46(3):65-73.
- [18] 王文俊. 福建龙岩地区土壤有机碳储量特征及其影响因素[J]. *第四纪研究*, 2012, 32(2):337-345.
- [19] 黄绍霖, 徐涵秋, 曾宏达, 等. 福建长汀河田盆地的马尾松林碳储量时空动态变化[J]. *地球科学*, 2013, 38(5):1081-1090.
- [20] 李明阳, 吴军, 余超, 等. 福建武夷山自然保护区森林碳储量遥感估测方法与空间分析[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2014, 38(6):6-10.
- [21] 师吉红, 项佳, 刘健, 等. 南方红壤典型水土流失区马尾松林地上林木碳储量的遥感监测: 以长汀县河田镇为例[J]. *生态学报*, 2021, 41(6):2151-2160.
- [22] 王开德, 邓璐莹. 基于森林清查资料的福建森林植被碳储量及其动态变化[J]. *福建林学院学报*, 2014, 34(2):145-151.
- [23] 吴文斌, 黄朝法, 郑德祥, 等. 福建省森林碳储量及碳密度特征分析[J]. *四川农业大学学报*, 2016, 34(3):298-303.
- [24] 陈中星, 张楠, 张黎明, 等. 福建省土壤有机碳储量估算的尺度效应研究[J]. *土壤学报*, 2018, 55(3):606-619.
- [25] 王文俊. 福建省土壤有机碳储量估算、时空分布特征及其影响因素[J]. *现代地质*, 2019, 33(6):1295-1305.
- [26] Wang Xiaojun, Zhong Wei, Li Tianhang, et al. A 16.2-kyr lacustrine sediment record of mercury deposition in Dahu Swamp, Eastern Nanling Mountains, Southern China: analysis of implications for climatic changes [J]. *Quaternary International*, 2021, 592:12-21.
- [27] 苏开敏. 基于 GIS 技术的福建省茶树用地适宜性评价及其区划[D]. 福建福州: 福建农林大学, 2008.
- [28] 王小军, 刘光旭, 王炳香, 等. 基于气候因子的油茶含油率时空特征与种植分区研究[J]. *云南大学学报(自然科学版)*, 2020, 42(6):1202-1211.
- [29] 王小军, 刘光旭, 肖彤. 气候变化情景下油茶生长的适宜性特征[J]. *热带地理*, 2020, 40(5):868-880.
- [30] 方精云, 黄耀, 朱江玲, 等. 森林生态系统碳收支及其影响机制[J]. *中国基础科学*, 2015, 17(3):20-25.
- [31] 郭云, 李鹏, 程维金, 等. 洞庭湖土地利用和生态服务功能时空变化及其耦合效应分析[J]. *环境科学学报*, 2022, 42(1):121-130.
- [32] 朱志强, 马晓双, 胡洪. 基于耦合 FLUS-InVEST 模型的广州市生态系统碳储量时空演变与预测[J]. *水土保持通报*, 2021, 41(2):222-229.
- [33] 张凯琪, 陈建军, 侯建坤, 等. 耦合 InVEST 与 GeoSOS-FLUS 模型的桂林市碳储量可持续发展研究[J]. *中国环境科学*, 2022, 42(6):2799-2809.

- 尺度效应研究[J].土壤学报,2018,55(3):606-619.
- [6] Zhao Gang, Bryan B A, King D, et al. Impact of agricultural management practices on soil organic carbon: Simulation of Australian wheat systems [J]. *Global Change Biology*, 2013,19(5):1585-1597.
- [7] 韩冰,王效科,欧阳志云.中国农田生态系统土壤碳库的饱和水平及其固碳潜力[J].农村生态环境,2005,21(4):6-11.
- [8] Tang Huajun, Qiu Jianjun, van Ranst E, et al. Estimations of soil organic carbon storage in cropland of China based on DNDC model [J]. *Geoderma*, 2006,134(1/2):200-206.
- [9] Xu Shengxiang, Shi Xuezheng, Zhao Yongcun, et al. Carbon sequestration potential of recommended management practices for paddy soils of China,1980—2050 [J]. *Geoderma*, 2011,166(1):206-213.
- [10] Yang Jie, Huang Xin. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019 [J]. *Earth System Science Data*, 2021,13(8):3907-3925.
- [11] Tallis H T, Ricketts T, Guerry A D, et al. InVEST 2.5.3 User's Guide [M]. The Natural Capital Project, Stanford, 2013.
- [12] 武慧君,姚有如,苗雨青,等.芜湖市城市森林土壤理化性质及碳库研究[J].土壤通报,2018,49(5):1015-1023.
- [13] 史志华,刘前进,张含玉,等.近十年土壤侵蚀与水土保持研究进展与展望[J].土壤学报,2020,57(5):1117-1127.
- [14] 吴素业.安徽大别山区降雨侵蚀力简化算法与时空分布规律[J].中国水土保持,1994(4):12-13.
- [15] 梁音,史学正.长江以南东南部丘陵山区土壤可蚀性 K 值研究[J].水土保持研究,1999,6(2):47-52.
- [16] 张群.巢湖流域土壤侵蚀与水土保持环境效益评价[D].安徽 芜湖:安徽师范大学,2013.
- [17] 庄大方,刘纪远.中国土地利用程度的区域分异模型研究[J].自然资源学报,1997,12(2):105-111.
- [18] 林海明,杜子芳.主成分分析综合评价应该注意的问题[J].统计研究,2013,30(8):25-31.
- [19] 卢开东,王健健,马燮桃,等.基于 DPSIR 模型的芜湖市水生态承载力研究与建议[J].环境工程技术学报,2022,12(2):538-545.
- [20] 陈姗姗,刘康,李婷,等.基于 InVEST 模型的商洛市水土保持生态服务功能研究[J].土壤学报,2016,53(3):800-807.
- [21] 杨君,周鹏全,袁淑君,等.基于 InVEST 模型的洞庭湖生态经济区生态系统服务功能研究[J].水土保持通报,2022,42(1):267-272.
- [22] 王大尚,李屹峰,郑华,等.密云水库上游流域生态系统服务功能空间特征及其与居民福祉的关系[J].生态学报,2014,34(1):70-81.
- [23] Bai Yang, Zhuang Changwei, Ouyang Zhiyun, et al. Spatial characteristics between biodiversity and ecosystem services in a human-dominated watershed [J]. *Ecological Complexity*, 2011,8(2):177-183.
- [24] 王蓓,赵军,胡秀芳.基于 InVEST 模型的黑河流域生态系统服务空间格局分析[J].生态学杂志,2016,35(10):2783-2792.
- [25] 张立伟,傅伯杰.生态系统服务制图研究进展[J].生态学报,2014,34(2):316-325.
- [26] 钟亮,林媚珍,周汝波.基于 InVEST 模型的佛山市生态系统服务空间格局分析[J].生态科学,2020,39(5):16-25.
- [27] 雷军成,刘纪新,雍凡,等.基于 CLUE-S 和 InVEST 模型的五马河流域生态系统服务多情景评估[J].生态与农村环境学报,2017,33(12):1084-1093.
- [28] 王秀明,刘谔承,龙颖贤,等.基于改进的 InVEST 模型的韶关市生态系统服务功能时空变化特征及影响因素[J].水土保持研究,2020,27(5):381-388.

(上接第 364 页)

- [34] 赵一行,高润艺,李海东,等.江阴市土地利用对碳储量的影响及优化研究[J].生态与农村环境学报,2022,38(10):1290-1298.
- [35] 孙方虎,方风满,洪炜林,等.基于 PLUS 和 InVEST 模型的安徽省碳储量演化分析与预测[J].水土保持学报,2023,37(1):151-158.
- [36] 朱丽亚,胡克,孙爽,等.基于 InVEST 模型的辽宁省海岸带碳储量时空变化研究[J].现代地质,2022,36(1):96-104.
- [37] 邵壮,陈然,赵晶,等.基于 FLUS 与 InVEST 模型的北京市生态系统碳储量时空演变与预测[J].生态学报,2022,42(23):9456-9469.
- [38] 张鹏,李良涛,苏玉姣,等.基于 PLUS 和 In VEST 模型的邯郸市碳储量空间分布特征研究[J].水土保持通报,2023,43(3):338-348.
- [39] 张楚强,向洋,方婷,等. LUCC 影响下太原市生态系统碳储量时空变化及预测[J].安全与环境工程,2022,29(6):248-258.
- [40] 任玺锦,裴婷婷,陈英,等.基于碳密度修正的甘肃省土地利用变化对碳储量的影响[J].生态科学,2021,40(4):66-74.
- [41] 韩敏,徐长春,隆云霞,等.西北干旱区不同土地利用情景下的碳储量及碳源/汇变化模拟与预估[J].水土保持通报,2022,42(3):335-344.
- [42] 姚楠,刘广全,姚顺波,等.基于 InVEST 模型的黄土丘陵沟壑区退耕还林还草工程对生态系统碳储量的影响评估[J].水土保持通报,2022,42(5):329-336.