



应用生态学报

Chinese Journal of Applied Ecology

ISSN 1001-9332, CN 21-1253/Q

《应用生态学报》网络首发论文

题目: 浙江省土地利用变化对生态系统固碳服务的影响及其预测
作者: 徐彩瑶, 任燕, 孔凡斌
DOI: 10.13287/j.1001-9332.202306.024
收稿日期: 2023-01-15
网络首发日期: 2023-04-11
引用格式: 徐彩瑶, 任燕, 孔凡斌. 浙江省土地利用变化对生态系统固碳服务的影响及其预测[J/OL]. 应用生态学报. <https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.202306.024>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

浙江省土地利用变化对生态系统固碳服务的影响及其预测

徐彩瑶^{1,2}, 任燕², 孔凡斌^{1,2,3*}

(¹浙江农林大学生态文明研究院/浙江省乡村振兴研究院, 杭州 311300; ²浙江农林大学经济管理学院, 杭州 311300; ³南京林业大学经济管理学院, 南京 210037)

*通信作者 孔凡斌, E-mail: kongfanbin@aliyun.com

摘要 明确土地利用变化对生态系统固碳服务对于探索基于自然的碳中和解决方案至关重要。以浙江省为研究对象, 运用 InVEST 模型和 FLUS 模型, 分析 2000—2021 年土地利用变化及其对生态系统固碳服务的影响, 并分别预测 2035 和 2050 年土地利用格局在自然发展、生态保护和耕地保护 3 种情景下的生态系统固碳服务潜力及其经济价值。结果表明: 2000—2021 年, 浙江省耕地、林地、草地和水域面积的不断减少, 建设用地面积不断增加; 生态系统固碳服务总量减少 2996.58 万 t, 碳汇净收益为 -17071.84 万美元; 生态系统固碳服务分布呈现西南高、东北低的空间格局。未来浙江省生态系统固碳服务总量均在生态保护情景下最高, 耕地保护情景次之, 自然发展情景最低。预计 2021—2035、2021—2050 年, 浙江省生态系统固碳服务在生态保护情景下将分别增加 323.26 和 473.00 万 t, 产生碳汇净收益分别为 7707.86 和 11183.91 万美元; 在耕地保护情景下将分别减少 154689.19 和 154086.25 万 t, 产生碳汇经济价值净流失分别为 24138.49 和 38191.09 万美元; 在自然发展情景下将分别减少 154537.46 和 154085.85 万 t, 导致碳汇经济价值净流失分别为 27753.93 和 38200.63 万美元。在积极应对气候变化和推动实现碳中和目标背景下, 浙江省应着力保护林地、草地和水域等生态用地, 扩大生态用地规模, 优化生态用地空间结构, 不断增强生态用地的固碳增汇功能。

关键词 土地利用; 固碳服务; FLUS 模型; InVEST 模型; 情景预测

DOI: 10.13287/j.1001-9332.202306.024

Impact and prediction of land use change on ecosystem carbon sequestration service in Zhejiang Province, China

XU Caiyao^{1,2}, REN Yan², KONG Fanbin^{1,2,3*}

(¹Institute of Ecological Civilization/Zhejiang Institute of Rural Revitalization, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, China; ²School of Economics and Management, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, China; ³School of Economics and Management, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract It is crucial to clarify the impact of land use change on ecosystem carbon sequestration service for exploring natural-based carbon neutral solutions. We used InVEST and FLUS models to analyze land use change and its impact on ecosystem carbon sequestration service in Zhejiang Province from 2000 to 2021, and predict ecosystem carbon sequestration service potential and its economic value of land use pattern in 2035 and 2050 under three scenarios (natural development, ecological protection and cultivated land protection). The results showed that, from 2000 to 2021, the area of cultivated land, forest, grassland and water continued to reduce and the area of construction land continued to increase in Zhejiang Province. The total amount of ecosystem carbon sequestration service decreased by 29.9658 million t, and the net income of carbon sinks was -170.7184 million dollars. The distribution of ecosystem carbon sequestration services showed a spatial pattern of high in the southwest and low in the northeast. In the future, the total amount of ecosystem carbon sequestration services in Zhejiang Province would be the highest under the ecological protection scenario, followed by the cultivated land protection scenario, and the lowest under the natural development scenario. It was estimated that from 2021 to 2035 and 2050, the ecosystem carbon sequestration services in Zhejiang Province would increase by 3.2326 and 4.73 million t respectively under the

收稿日期: 2023-01-15

基金项目: 浙江省社会科学领军人才培养专项(21YJRC12-2YB)资助。

作者简介: 徐彩瑶, 女, 1989 年生, 博士, 讲师。主要从事可持续生态学、生态经济、资源环境经济研究。E-mail: caiyao@126.com

网络首发时间: 2023-04-11 17:05:10 网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1253.Q.20230411.1412.001.html>

ecological protection scenario, generating net carbon sink benefits of 77.0786 and 111.8391 million dollars, respectively. Under the cultivated land protection scenario, it would reduce by 1546.8919 and 1540.8625 million t, and the net loss of carbon sink value would be 241.3849 and 381.9109 million dollars, respectively. Under the natural development scenario, it would reduce by 1545.3746 and 1540.8585 million t, resulting in a net loss of carbon sink value of 277.5393 and 382.0063 million dollars, respectively. In the context of actively addressing climate change and striving to achieve the goal of carbon neutrality, Zhejiang Province should focus on protecting ecological land such as woodlands, grasslands, and waters, expand the scale of ecological land, optimize the spatial structure of ecological land, and continuously enhance the carbon sequestration and sink enhancement functions of ecological land.

Key words land use; carbon sequestration service; FLUS model; InVEST model; scenario prediction

生态系统固碳服务是生态系统碳汇能力的重要表征,明确生态系统固碳服务变化的影响因素,对于探索基于自然的碳中和解决方案至关重要^[1]。陆地生态系统碳库在全球碳循环中起着非常重要的作用^[2]。人类活动引起的土地利用变化是造成陆地生态系统固碳服务功能变化的重要因素之一^[3-7]。土地利用变化对生态系统固碳服务的影响已经成为土地利用变化和全球应对气候变化研究共同关注的核心内容。基于土地利用变化分析生态系统固碳服务的演变规律并进行多情景预测,对于有效掌握区域生态系统固碳能力及未来潜力以及探索基于自然的碳中和解决方案,具有重要的科学意义。党的二十大报告将提升生态系统碳汇能力作为积极稳妥推进碳达峰碳中和战略的重要措施。中共中央国务院发布《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》^[8]和《2030年前碳达峰行动方案》^[9]提出“建立健全能够体现碳汇价值的生态保护补偿机制”。科学评估并预测生态系统固碳服务及其经济价值,不仅可以为优化国土空间格局及服务碳中和战略提供科学依据,还可以为建立健全能够体现碳汇价值的生态保护补偿机制提供政策参考,具有重要的实践意义。

利用多模型耦合分析生态系统固碳服务及预测是当前掌握区域生态系统固碳服务供给状况及未来趋势的主要方法。用于分析土地利用变化的模型有 CA-Markov 模型^[10]、系统动力学模型^[11]、CLUE-S 模型^[12]、FLUS 模型^[13]等,其中,FLUS 模型具有预测未来土地利用的准确模拟能力^[14]。用于测算固碳服务的方法有 CENTURY 模型^[15]、RothC 模型^[16]、实地调查法等,这些方法通常用于小尺度研究,而 InVEST 模型可以评估不同尺度的固碳量^[17-18]。此外,现有研究耦合 FLUS 和 InVEST 模型分析并预测区域生境质量^[19]、生态系统固碳服务^[20]等,为不同尺度生态系统固碳服务的掌握及潜力预测提供了可靠的方法借鉴。然而,既有研究主要关注城市或城市群^[21]以及森林、流域、红树林等单一类型的生态系统^[22-24],对省级行政单元层面的综合性研究以及生态系统固碳服务经济价值的核算鲜少涉及,使得相关研究为决策管理者提供的科学依据还比较有限,亟待深化研究。

浙江省从 2003 年开始的生态省建设对浙江省全域土地利用变化和包括固碳服务在内的生态系统服务能力产生了重要影响,然而,现有研究对浙江省土地利用变化和生态系统固碳服务变化及其相互关系的探索尚少有涉及且不深入。2022 年,浙江省提出要通过提升生态碳汇推动构建人与自然和谐共生的现代化浙江新境界的目标任务。分析浙江省土地利用变化对于生态系统固碳服务的影响,预测浙江省中长期及远期生态系统固碳服务的供给能力,据此提出优化土地利用推动生态系统固碳服务能力提升的对策建议,具有典型示范意义。鉴于此,本研究运用 InVEST 模型和 FLUS 模型分析 2000—2021 年浙江省土地利用及生态系统固碳服务的时空演变特征,设置自然发展、生态保护和耕地保护 3 种未来情景,预测 2035 和 2050 年浙江省不同情景下生态系统固碳服务潜力及其经济价值,以期率先探索基于自然的碳中和解决方案提供科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

浙江省位于中国东南沿海长江三角洲南翼(27°02'—31°11'N, 118°01'—123°10'E),地处亚热带中部(图 1),属于季风性湿润气候,气温适中,四季分明,光照充足,雨量丰沛。浙江省年平均气温 18.70℃,年均降水量 1810.20 mm,土地面积 10.56 万 km²,2021 年末人口总数为 5095.78 万^[25]。全省包括杭州、宁波、温州、嘉兴、湖州、绍兴、金华、衢州、舟山、台州、丽水 11 个地级市,区

域内地势自西南向东北呈阶梯状倾斜,地形复杂,山地占 74.6%,水域占 5.1%,平坦地占 20.3%,形成“七山一水两分田”的分布格局。浙江省现有森林面积 607.53 万 hm^2 ,森林覆盖率 61.2%^[26],丰富的森林资源为探索基于自然的碳中和解决方案奠定了良好自然基础。

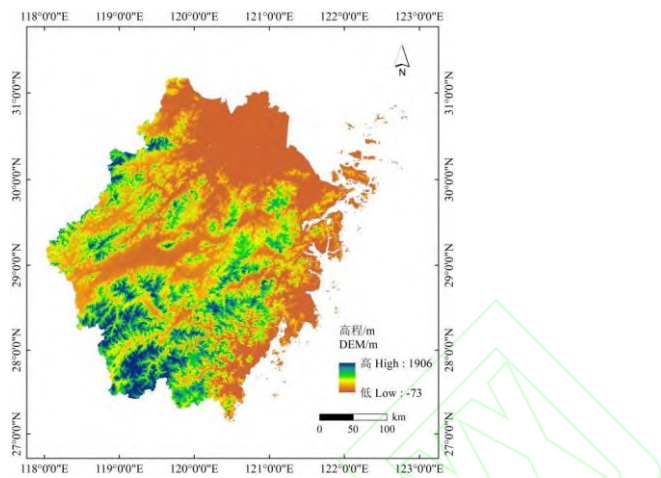


图 1 研究区区位
Fig.1 Location of the study area.

该图基于审图号为 GS(2019) 1822 号的标准地图制作,底图无修改 The map was made based on the standard map with the drawing review No. GS(2019) 1822, and the base map was not modified. 下同 The same below.

1.2 数据来源与处理

本研究利用 2000、2007、2014 和 2021 年 4 期土地利用数据来分析 2000—2021 年浙江省土地利用变化情况,所用数据来自中国土地利用/覆被数据库(China's Land-Use/cover Datasets, CLUDs, <https://zenodo.org/record/5816591>)^[27],数据精度已被验证(总体精度在 76.5%~82.5%)。该数据集将土地利用类型划分为耕地、林地、灌木、草地、水域、冰川、未利用地、建设用地、湿地 9 种。根据研究区边界裁剪,并按国家标准《土地利用现状分类》(GB/T 21010—2017)^[28]将灌木划分为林地,得到研究区土地利用分类包括耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地 6 种。考虑到未利用地面积过小(面积占比低于 0.01%)且变化不大,本研究未进行分析。因此,研究区最终的土地利用分类采用耕地、林地、草地、水域、建设用地 5 种类型。参考已有研究^[29],以数字高程模型(DEM)、坡度、坡向、年均气温、年降水量、河流作为自然因素^[30],公路、铁路、居民点作为社会因素^[31]。其中,DEM 数据来自地理空间数据云(<https://www.gscloud.cn/search>),坡度和坡向数据借助 ArcGIS 10.7 通过 DEM 数据计算得到;河流、公路、铁路、居民点数据来自国家基础地理信息中心(<http://www.webmap.cn>),并用 ArcGIS 10.7 中欧式距离分析处理;年均气温、年降水量来自中国气象网(<http://data.cma.cn/>),并利用 ArcGIS 10.7 中反距离权重法处理获得。为保证栅格数据行列数一致,将采样分辨率统一设置为 500 m×500 m。

1.3 FLUS 模型

FLUS 可模拟多个土地利用变化的长期空间轨迹,具有对未来土地利用的准确模拟能力^[14]。FLUS 模型主要包括用地需求预测、适宜性概率、总概率和领域因子以及转换成本矩阵等部分。

1.3.1 用地需求预测用地需求预测分为两部分。1) 精度检验。以浙江省 2007 和 2014 年土地利用数据为基础,通过马尔科夫链预测 2021 年用地需求;2) 未来情景下土地需求预测。以浙江省 2014 和 2021 年土地利用数据为基础,通过马尔科夫链预测 2035 年的用地需求。为使结果更加具有前瞻性,本研究基于 2020 和 2035 年土地用数据预测 2050 年的用地需求。马尔科夫链的计算公式如下:

$$S_{t+1} = P_{ab} \times S_t \tag{1}$$

式中: S_t 、 S_{t+1} 为 t 、 $t+1$ 时段浙江省土地利用类型状态矩阵; P_{ab} 表示由类型 a 转化为类型 b 的转移概率矩阵。

1.3.2 适宜性概率、总概率和领域因子本研究选取高程、坡度、坡向、降水、温度以及到铁路、河流、公路、居民点的距离作为土地利用变化驱动因子，结合土地利用分类数据，通过神经网络（ANN）整合计算出适宜性概率，计算公式如下：

$$sg(g,k,t) = \sum_n w_{n,k} \times sigmoid(net(g,t)) = \sum_n w_{n,k} \times \frac{1}{1+e^{-net(g,t)}} \tag{2}$$

式中：sg(g,k,t)表示当时间为 t 时，在栅格 g 上第 k 种土地利用类型的适宜性概率；w_{n,k} 是隐藏层和输出层间的权重；sigmoid(·)是隐藏层至输出层的激励函数；net(g,t)表示在时间 t 上从栅格 g 接收到的信号。

计算出每个栅格的适宜性概率后，通过 CA 模型迭代，将不同的土地利用类型分配到不同栅格中。在 t 时刻，栅格 g 转换为第 k 种土地利用类型的总概率为 Tp_{g,k}^t，计算公式如下：

$$Tp_{g,k}^t = sg(g,k,t) \times \Omega_{g,k}^t \times (1 - sp_{p \rightarrow k}) \tag{3}$$

$$\Omega_{g,k}^t = \frac{\sum_{N \times N} con(p_{g-k}^{t-1} = k)}{N \times N - 1} \times W_k \tag{4}$$

式中：sp_{p→k} 为土地利用类型 p 转化为类型 k 的成本；1-sp_{p→k} 代表土地利用类型之间转换的难易程度；Ω_{g,k}^t 为邻域因子；Σ_{N×N}con(p_{g-k}^{t-1}=k)表示在 N×N 的 Moore 邻域窗口，上一次迭代结束后第 k 种土地利用类型的栅格总量；W_k为第 k 种用地类型的领域因子权重。参考自然发展条件下浙江省土地转移规则，经过不断调试和验证得到邻域因子权重，耕地、林地、草地、水体和建设用地分别为 0.5、0.01、0.3、0.2 和 1。将土地利用类型的扩张能力依次定义为建设用地>耕地>草地>水体>林地。

1.3.3 转换成本矩阵 FLUS 模型中的转换成本矩阵表示土地利用类型之间的相互转换。本研究设定 3 种情景，即自然发展情景（S1）、生态保护情景（S2）和耕地保护情景（S3），并设置不同情景的土地利用转移成本矩阵进行空间约束（表 1）。在自然发展情景下，利用马尔科夫链预测未来土地利用情况，设置转移成本矩阵为各类土地都可以相互转化；在生态保护情景下，按照土地利用类型的生态效益进行排序，从高到低依次为林地、草地、耕地、水域、建设用地，转换原则不允许排序高向排序低转换^[32-33]；在耕地保护情景下，耕地不能够转换为其他土地利用类型，除建设用地外其他土地利用类型均可以转换为耕地^[34-36]，建设用地不轻易转为其他土地利用类型。

表1 各情景下土地利用的转移成本矩阵
Table1 Conversion cost matrix of land use under each scenario

情景 Scenario	土地利用类型 Landuse type	耕地 Cultivated land	林地 Woodland	草地 Grassland	水域 Water	建设用地 Construction land
自然发展情景 Natural development scenario	耕地 Cultivated land	1	1	1	1	1
	林地 Woodland	1	1	1	1	1
	草地 Grassland	1	1	1	1	1
	水域 Water	1	1	1	1	1
	建设用地 Construction land	1	1	1	1	1
生态保护情景 Ecological protection scenario	耕地 Cultivated land	1	1	1	0	0
	林地 Woodland	0	1	0	0	0
	草地 Grassland	0	1	1	0	0
	水域 Water	1	1	1	1	0
	建设用地 Construction land	1	1	1	1	1
耕地保护情景 Cultivated land protection scenario	耕地 Cultivated land	1	0	0	0	0
	林地 Woodland	1	1	1	1	1
	草地 Grassland	1	1	1	1	1
	水域 Water	1	1	1	1	1
	建设用地 Construction land	0	0	0	0	1

1 表示允许转换，0 表示不允许转换 1 meant that conversion was allowed, and 0 meant that conversion was not allowed.

1.3.4 模型模拟的精度验证本研究基于 2014 年土地利用数据，结合适宜性概率分布与 2021 年用地需求预测模拟得到 2021 年土地利用分布，将结果与 2021 年实际土地利用状况对比，利用 Kappa 系

数进行模拟精度验证。一般来说， $Kappa \leq 0.5$ 时，模型模拟精度较差； $0.5 < Kappa \leq 0.75$ ，模型仿真精度一般； $0.75 < Kappa \leq 1$ ，模拟精度较好。本研究计算的 Kappa 系数为 0.81，总体精度为 0.92，表明模拟效果较好。

1.4 InVEST 模型

1.4.1 生态系统固碳服务评估 InVEST 模型中的固碳 (carbon storage and sequestration) 模块将生态系统固碳服务划分为 4 个基本碳库：

$$C_{total} = \sum_{i=1}^5 (C_{i_above} + C_{i_below} + C_{i_soil} + C_{i_dead}) \times A_i \tag{5}$$

式中： C_{total} 表示生态系统固碳服务总量； C_{i_above} 、 C_{i_below} 、 C_{i_soil} 和 C_{i_dead} 分别表示第 i 种土地利用类型的地上碳密度、地下碳密度、土壤碳密度和死亡有机物碳密度； A_i 为第 i 种土地利用类型的面积。相同气候条件下，相同土地利用类型的碳密度相似，因此本研究选取与浙江省地理位置相近区域的碳密度数据^[37-39]并取均值；地上碳密度、地下碳密度和死亡有机物碳密度数据来自文献[40]，得到不同土地利用类型的碳密度数据（表 2）。

表2不同土地利用类型的碳密度
Table2 Carbon density of different landuse types(t·hm⁻²)

土地利用类型 Landuse type	地上碳密度 Aboveground carbon density	地下碳密度 Underground carbon density	土壤碳密度 Soil carbon density	死亡有机物碳密度 Dead organic matter carbon density
耕地 Cultivated land	18.9	12.5	85.5	2.4
林地 Woodland	36.3	7.3	125.8	3.4
草地 Grassland	17.4	20.8	112.2	2.9
水域 Water	0	0	81.1	0
建设用地 Construction land	16.2	3.2	73	0

1.4.2 生态系统固碳服务的经济价值评估参照已有研究^[20,41]，采用 InVEST 模型计算浙江省生态系统固碳服务的经济价值，具体公式如下：

$$value_seq_x = V \frac{sequest_x}{Y_{r_fut} - Y_{r_cur}} \sum_{t=0}^{Y_{r_fut} - Y_{r_cur}} \frac{1}{(1 + \frac{r}{100})^t (1 + \frac{c}{100})^t} \tag{6}$$

式中： $value_seq_x$ 为固碳栅格 x 在未来土地利用变化情景下固碳服务的经济价值（美元）； V 为每吨固碳服务量的价值（美元）； r 为市场贴现率（%）； c 表示每吨固碳服务价值的年变化率（%）； Y_{r_cur} 表示当前土地利用情景下生态系统固碳服务量； Y_{r_fut} 表示未来土地利用情景下生态系统固碳服务量； $sequest_x$ 表示当前和未来土地利用情景下栅格 x 中生态系统固碳服务变化量； t 表示研究时段。参考已有研究，中国碳排放的社会成本为 24 美元·t⁻¹^[42]，不考虑碳排放的社会成本年际变化率，即设置变化率为 0^[43]；基于亚洲发展银行进行项目评估时采用 10%~12% 的贴现率^[44]，本研究最终将固碳服务的经济价值市场贴现率确定为 11%。

2 结果与分析

2.1 浙江省土地利用变化的时空特征

研究期间，浙江省土地利用类型以林地、耕地、建设用地为主，草地较少。由表 3 可以看出，2000—2021 年间，研究区建设用地面积由 3671.03 km² 增至 8919.11 km²，其他地类的面积均有不同程度的减少，其中，林地面积减少最多，由 69236.85 km² 减至 66472.18 km²。土地利用转移面积量排在前 3 位的分别是林地转移为耕地（6680.12 km²）、耕地转为建设用地（5264.44 km²）、耕地转为林地（4783.66 km²）。可见，建设用地的扩张侵占了大量耕地。此外，杭州湾区域由于建设用地的扩张导致水域面积缩小（图 2）。总体看来，浙江省东北区域以及中部（金华市）的建设用地明显增加，而处于浙西南山区的衢州市和丽水市，建设用地扩张的增幅弱于其他城市。

表3 2000—2021年土地利用转移矩阵
Table3 Land-use transfer matrix from 2000 to 2021 (km²)

2000 年地类 Land use type in 2000	2021 年地类 Land use type in 2021					总计 Sum
	耕地 Cultivated land	林地 Woodland	草地 Grassland	水域 Water	建设用地 Construction land	
耕地 Cultivated land	15266.80	4783.66	0.84	953.56	5264.44	26269.30
林地 Woodland	6680.12	60594.79	10.17	543.83	1407.93	69236.85
草地 Grassland	1.86	10.80	0.00	0.00	0.30	12.97
水域 Water	999.54	567.20	0.09	2022.31	657.81	4246.95
建设用地 Construction land	1391.73	515.72	0.14	174.82	1588.62	3671.03
总计 Sum	24340.05	66472.18	11.24	3694.52	8919.11	103437.10



图2 2000—2021年浙江省土地利用的空间分布
Fig.2Spatial distribution of land use inZhejiang Province from 2000 to 2021.

2.2 不同情景下土地利用模拟

基于设定的成本转换矩阵（表 1），得到不同情景下 2035 和 2050 年浙江省土地利用情况（表 4 和图 3）。在自然发展情景下，耕地、建设用地进一步扩张，扩张区域主要集中于杭州湾以及东部沿海区域。2021—2035 年，耕地和建设用地分别增加 1.9%和 14.3%，林地、草地和水域分别减少 2.7%、4.4%和 5.0%；2021—2050 年，耕地和建设用地分别增加 5.1%和 18.9%，林地、草地和水域分别减少 4.0%、4.4%和 13.8%。由此可见，随着社会经济的发展，土地开发需求愈加强烈，会不断侵占其他生态用地。在生态保护情景下，2021—2035 年，耕地增加 2.9%，林地、草地、水域和建设用地分别减少 0.1%、2.2%、5.0%和 7.9%；2021—2050 年，耕地增加 4.0%，草地、建设用地和水域分别减少 4.4%、7.9%和 13.8%。可见，在生态保护情景下，建设用地不再扩张，反而减少，空间聚集程度减弱；从远期（2050 年）看，该情景下林地面积不再减少，保持稳定。在耕地保护情景下，2021—2035 年，耕地和建设用地分别增加 4.2%和 8.1%，林地、草地和水域分别减少 2.7%、4.4%和 5.0%；2021—2050 年，耕地和建设用地分别增加 5.1%和 18.9%，林地、草地和水域分别减少 4.0%、4.4%和 13.8%。2021—2035 年间，耕地保护情景下耕地面积增幅明显大于自然发展情景；2021—2050 年间，耕地保护情景下耕地面积增幅与自然发展情景一致。

表4不同情景下各土地利用类型面积及变化率
Table4 Area and change rate of various land use types under different scenarios

年份 Year	情景 Scenario	耕地 Cultivated land		林地 Woodland		草地 Grassland		水域 Water		建设用地 Construction land	
		面积	变化率	面积	变化率	面积	变化率	面积	变化率	面积	变化率
		Area (km ²)	Change rate (%)	Area (km ²)	Change rate (%)	Area (km ²)	Change rate (%)	Area (km ²)	Change rate (%)	Area (km ²)	Change rate (%)
2021	-	24466.25	-	66657.50	-	11.25	-	3744.50	-	9008.75	-
2035	S1	24926.50	1.9	64832.50	-2.7	10.75	-4.4	3558.25	-5.0	10299.00	14.3
2035	S2	25164.25	2.9	66599.50	-0.1	11.00	-2.2	3558.25	-5.0	8294.00	-7.9
2035	S3	25487.00	4.2	64833.25	-2.7	10.75	-4.4	3558.25	-5.0	9737.75	8.1
2050	S1	25715.25	5.1	63961.75	-4.0	10.75	-4.4	3228.00	-13.8	10711.25	18.9
2050	S2	25444.75	4.0	66645.25	0.0	10.75	-4.4	3228.00	-13.8	8298.25	-7.9
2050	S3	25716.00	5.1	63962.00	-4.0	10.75	-4.4	3228.00	-13.8	10710.25	18.9

S1: 自然发展情景 Natural development scenario; S2: 生态保护情景 Ecological conservation scenario; S3: 耕地保护情景 Cultivated land conservation scenario.下同 The same below.

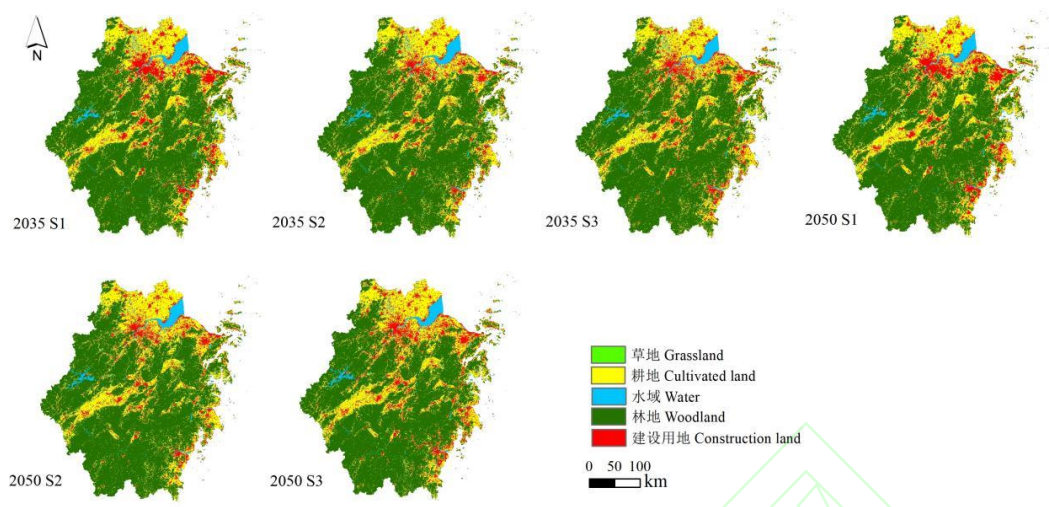


图3 不同情景下浙江省 2035 年和 2050 年土地利用模拟结果
Fig.3 Land use simulation results of Zhejiang Province in 2035 and 2050 under different scenarios.

S1: 自然发展情景 Natural development scenario; S2: 生态保护情景 Ecological conservation scenario; S3: 耕地保护情景 Cultivated land conservation scenario.下同 The same below.

2.3 浙江省生态系统固碳服务的时空演变特征

由表 5 可以看出，2000、2021 年，浙江省生态系统固碳服务总量分别为 158698.94 和 155702.36 万 t，期间生态系统固碳服务减少 2996.58 万 t。其中，2000—2007、2007—2014、2014—2021 年，固碳服务量分别减少 523.43、1399.7、1073.41 万 t。浙江省生态系统固碳服务分布表现出土壤碳库>地上碳库>地下碳库>死亡有机物碳库。2000—2021 年，土壤碳库损失最多，死亡有机物碳库损失最少，损失量分别为 2037.65 和 143.00 万 t。生态系统固碳服务呈现西南高、东北低的空间分布格局（图 4），其中，丽水市陆地生态系统固碳服务量最高，杭州湾及其周围区域较低。从分布区域来看，2000—2021 年，浙江省大部分地区生态系统固碳服务量保持不变，而杭州湾附近区域由于围海造地使得陆地面积扩大，进而增加了陆地生态系统固碳服务量。生态系统固碳服务量减少的区域主要位于浙江省的东北、中部区域以及东部沿海，分布较为分散，主要是由于建设用地扩张侵占了其他碳密度较高的用地。2000—2021 年间生态系统固碳服务量减少 1.89%（年际变化率为-0.09%），其中，2000—2007 年间减少 0.33%（年际变化率为-0.05%）；随着经济社会的发展，城镇化速度加快，高生态效益用地不断被侵占，生态系统固碳服务量减少程度加剧，2007—2014 年间减少 0.88%（年际变化率为-0.13%）；浙江省生态保护修复工程的推进使得生态系统固碳服务的减幅在 2014—2021 年间出现缓和（-0.68%，年际变化率为-0.10%）。虽然浙江省生态系统固碳服务总体呈现降低趋势，但 2014—2021 年间的降低速率小于 2007—2014 年。由此推断，党的十八大以来浙江省生态文明建设及生态保护修复工程实施的生态系统碳服务改善效应明显。

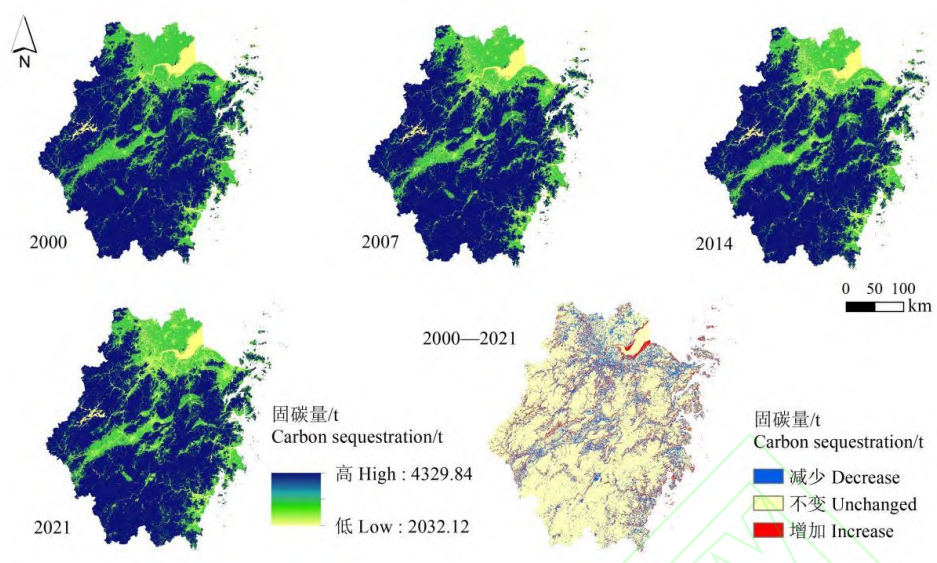


图 4 2000—2021 年浙江省生态系统固碳量的时空变化
Fig.4 Temporal and spatial variation of ecosystem carbon sequestration in Zhejiang Province from 2000 to 2021.

表5 2000—2021年生态系统固碳服务组成部分的变化
Table 5 Changes in carbon sequestration service components of ecosystems from 2000 to 2021 ($\times 10^4$ t)

年份 Year	地上碳 Aboveground carbon	地下碳 Underground carbon	土壤碳 Soil carbon	死亡有机物碳 Dead organic matter carbon	固碳总量 Total carbon sequestration
2000	30807.79	8491.89	116403.48	2995.78	158698.94
2007	30752.29	8290.17	116187.18	2945.88	158175.52
2014	30416.02	8202.82	115272.78	2884.15	156775.77
2021	30271.46	8212.28	114365.83	2852.79	155702.36
2000—2021	-536.33	-279.61	-2037.65	-143.00	-2996.58

2.4 不同情景下生态系统固碳服务预测

由图 5 可以看出，在自然发展情景下，2035 和 2050 年浙江省生态系统固碳服务总量分别为 154537.46 和 154085.85 万 t，与 2021 年相比分别减少 1164.90 和 1616.51 万 t；生态系统固碳服务低值区在空间上表现为局部聚集和零星分布。在生态保护情景下，2035 和 2050 年浙江省生态系统固碳服务总量分别为 156025.62 和 156175.36 万 t，与 2021 年相比分别增加 323.26 和 473.00 万 t。在耕地保护情景下，2035 和 2050 年浙江省生态系统固碳服务总量分别为 154689.19 和 154086.25 万 t，与 2021 年相比分别减少 1013.18 和 1616.11 万 t。在自然发展情景下，2021—2035、2021—2050 年间生态系统固碳服务总量分别减少 0.75%、1.04（年际变化率分别为-0.05%、-0.04%）；在生态保护情景下，2021—2035、2021—2050 年间生态系统固碳服务总量分别增加 0.21%、0.30%（年际变化率分别为 0.02%、0.01%）；在耕地保护情景下，2021—2035、2021—2050 年间生态系统固碳服务总量分别减少 0.65%、1.04%（年际变化率分别为-0.05%、-0.04%）。总的来说，2035 和 2050 年浙江省生态系统固碳服务总量均在生态保护情景下最高，耕地保护情景下次之，自然发展情景下最低。虽然自然发展情景和耕地保护情景在 2035 和 2050 年生态系统固碳服务总量仍处于减少趋势，但减少的速率远小于 2000—2021 年间的年际变化率。

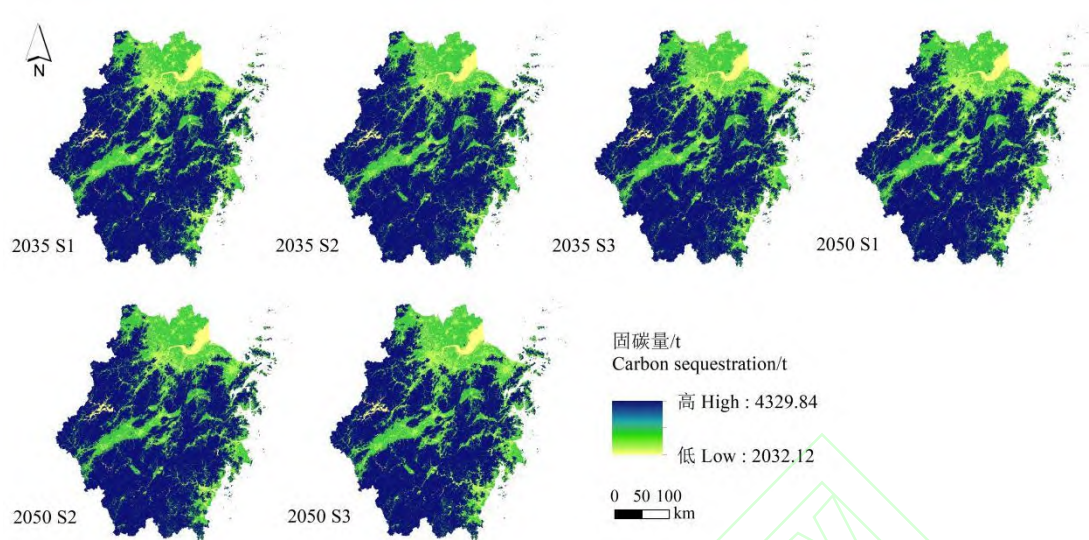


图 5 不同情景下 2035 和 2050 年浙江省生态系统固碳量的预测结果
Fig.5 Prediction results of ecosystem carbon sequestration in Zhejiang Province in 2035 and 2050 under different scenarios.

2.5 浙江省土地利用变化对生态系统固碳服务的影响

土地利用变化是影响陆地生态系统固碳服务的重要因素。林地转变为耕地或草地，使得陆地生态系统向大气中释放大量 CO₂，导致陆地生态系统固碳服务下降。研究表明，热带森林被破坏，其碳储量减少 40%^[45]。国家实施的退耕还林还草工程使得土地利用变化发生明显变化（耕地转变为林地或草地），CO₂ 被固定在森林和草地植被及其土壤之中，生态系统固碳服务显著增加^[41]。由此可见，不同土地利用类型对生态系统碳循环产生了不同影响，导致同一区域内各地类的碳密度存在差异^[46]。当低碳密度的地类扩张，侵占高碳密度的地类时，生态系统固碳服务量减少，反之，则增加。由图 6 可以看出，2000—2021 年，由于建设用地的扩张和其他地类面积的缩小，浙江省生态系统固碳服务的增加量主要来自建设用地，其他地类的生态系统固碳服务量都有不同程度的减少，其中，林地损失最多（4904.84 万 t）。据此得出，2000—2021 年间浙江省总体流失 17071.84 万美元的碳汇经济价值（图 7）。由于草地面积较少，导致草地生态系统固碳服务量变化不明显，因此在预测的情景中不予以讨论。

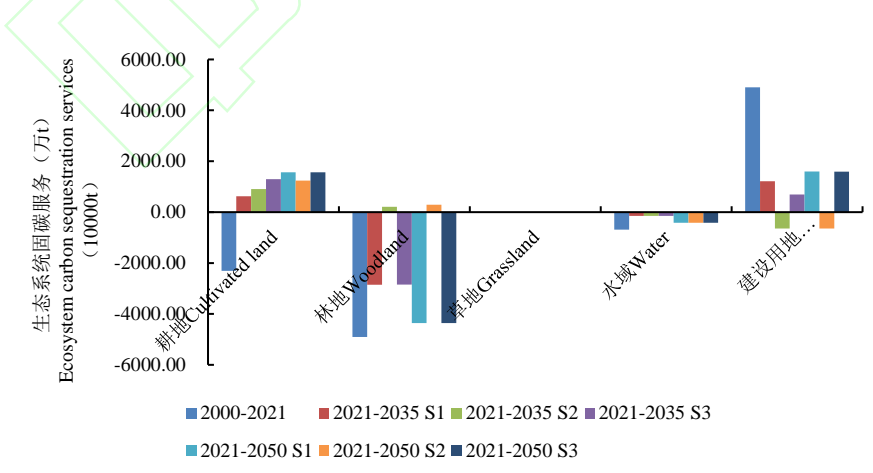


图 6 不同土地利用类型的生态系统固碳服务
Fig.6Ecosystem carbon sequestration service for different land-use types.

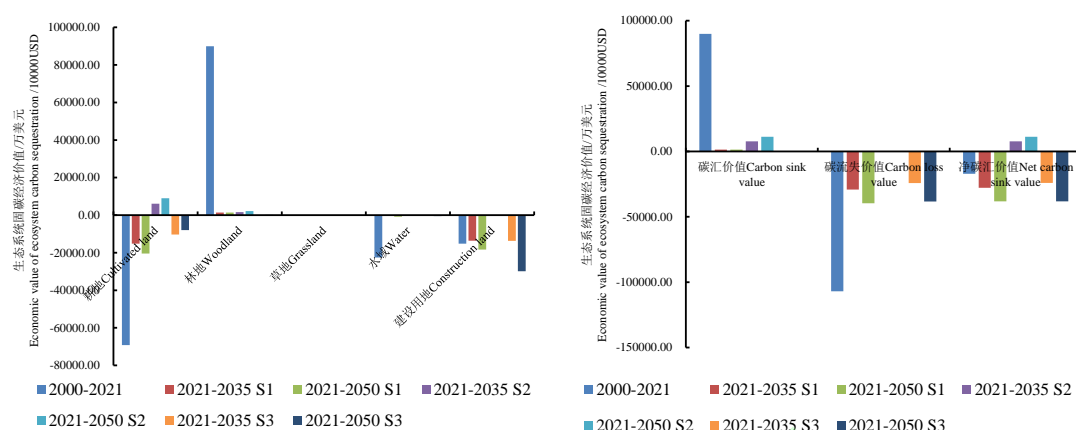


图7 不同土地利用类型生态系统固碳经济价值
Fig.7 Economic value of ecosystem carbon sequestration by different land-use types.

在自然发展情景下, 2021—2035 年建设用地和耕地的持续扩张使其生态系统固碳服务量不断增加, 且由于建设用地面积大幅增加导致建设用地固碳服务量增幅 (1211.81 万 t) 明显高于耕地 (622.07 万 t), 据此得出 2021—2035 年间浙江省总的碳汇净收益为-27753.93 万美元。2021—2050 年建设用地和耕地的固碳服务量增加, 分别为 1593.59 和 1565.19 万 t, 据此得出 2021—2050 年间浙江省总的碳汇净收益为-38200.63 万美元。

在生态保护情景下, 2021—2035 年耕地的扩张和林地趋于稳定不再减少, 使二者的固碳服务量增加, 据此耕地和林地带来的碳汇经济价值增加量分别为 6129.57 和 1603.25 万美元; 水域和建设用地固碳服务量减少, 导致 24.96 万美元的碳汇经济价值损失, 据此得出 2021—2035 年间浙江省总的碳汇净收益为 7707.86 万美元。其中, 耕地增加量最多 (906.35 万 t), 建设用地损失量最多 (645.03 万 t)。2021—2050 年耕地和林地的固碳服务量分别增加 1241.75 和 290.53 万 t, 据此得出二者带来的碳汇经济价值增加量分别为 9028.68 和 2183.34 万美元; 水域和建设用地固碳服务量分别减少 417.60 和 641.10 万 t, 导致流出 28.11 万美元的碳汇经济价值, 据此得出 2021—2050 年间浙江省总的碳汇净收益为 11183.91 万美元。

在耕地保护情景下, 2021—2035 年浙江省生态系统固碳服务分布表现为耕地和建设用地增加、林地和水域不断减少, 其中, 耕地面积大幅增长使其增加量最多 (1292.27 万 t), 林地损失量最多 (2847.73 万 t), 据此得出 2021—2035 年间浙江省总的碳汇净收益为-24138.49 万美元。2021—2050 年耕地和建设用地的固碳服务量分别增加 1566.09 和 1592.67 万 t, 林地和水域的固碳服务量分别减少 4356.68 和 417.60 万 t, 据此得出 2021—2050 年间浙江省总的碳汇净收益为-38191.09 万美元。

3 讨论

在推进“双碳”战略目标的背景下, 提升生态系统固碳增汇功能作为基于自然的碳中和解决方案, 备受政界和学界的共同关注^[47-48]。科学评估并准确预测生态系统固碳服务的现状及潜力成为正确管理生态系统助力实现碳中和目标的重要途径。本研究结果表明, 2000—2021 年浙江省土地利用变化表现出建设用地不断扩张、其他用地类型均减少的特征。浙江省在快速城镇化过程中, 全域生态系统固碳服务量减少, 碳汇净收益减少, 该结果与已有研究结果^[20]一致, 共同印证了高碳密度用地向低碳密度用地转移会导致生态系统固碳服务量的减少。

本研究通过预测浙江省 2035 和 2050 年在自然发展、生态保护与耕地保护 3 种情景下生态系统固碳服务的变化特征发现, 2035 和 2050 年浙江省生态系统固碳服务均在生态保护情景下最多。自然发展情景与耕地保护情景均使生态系统固碳服务遭受损失, 这是由于在这两种情景中, 没有严格限制高

生态效益用地与低生态效益用地之间的转换,使其高碳密度用地能够向低碳密度用地转移,致使生态系统固碳服务量减少,这与揣小伟等^[37]和卿苗等^[32]的研究结果一致。2020 和 2021 年,浙江省提出要通过生态系统碳汇试点建设全面提升生态系统固碳功能及率先推动基于自然生态碳汇的碳中和解决方案的中长期目标。本研究的情景预测结果表明,2035 和 2050 年浙江省生态系统固碳服务总量均在生态保护情景下最高,耕地保护情景下次之,自然发展情景下最低。因此,到 2035 年甚至是 2050 年或更长时期,浙江省都应注重保护林地、草地和水域等生态用地,不断扩大生态用地规模,优化生态用地空间布局,不断增强生态用地的固碳增汇功能。

本研究耦合 FLUS 模型和 InVEST 模型评估浙江省土地利用变化对生态系统固碳服务的影响,但由于土地利用变化对生态系统固碳服务影响的复杂性,在模拟过程中存在一定不确定性,可能会对模拟结果产生影响。首先,关于土地利用驱动因子的选取,不同驱动因子组合会得出不同的适宜性概率,最终产生不同的模拟结果。本研究选取 9 个土地利用驱动因子,但由于各个地区情况不同,影响土地利用变化的驱动因子也不尽相同,因此,本研究驱动因子组合可能不是最全面的。其次,在未来情景的设置上,本研究尚未关注政府在社会经济和土地规划政策方面对未来土地利用变化的限制和干预因素。因此,今后的研究可以设置更具政策导向的发展情景,以评估政策的实施效果。最后,本研究所用模型自身存在局限性。FLUS 模型中政策对土地利用变化的影响只能通过参数的设置来实现,准确性可能受到影响,因此,将政策指标体系转为地理空间要素,并用于仿真模型耦合,将是未来研究的一个突破。InVEST 模型中固碳模块对碳循环进行了简化,并且模型的估算是建立在对不同土地利用类型碳密度的基础上。虽然本研究采用与研究区相近区域或相同土地利用类型的碳密度进行核算,但受温度、降水和海拔等环境条件的影响,同一土地利用类型的碳密度往往也存在空间异质性,因此,今后应通过实地采样和实验室分析的方法来准确测量研究区不同土地利用类型的碳密度,提高模型评估结果的准确性。

4 结论

本研究运用 InVEST 模型评估了 2000—2021 年浙江省土地利用变化特征及其对生态系统固碳服务的影响,运用 FLUS 模型模拟了浙江省 2035 和 2050 年在自然发展情景、生态保护情景和耕地保护情景下的土地利用格局,评估了 3 种情景下浙江省 2035 和 2050 年生态系统固碳服务及所产生的碳汇经济价值。主要结论如下:

1) 2000—2021 年,浙江省林地、耕地、水域和草地逐渐减少,建设用地逐渐增加。其中,林地由 69236.85 km² 减至 66472.18 km²,耕地由 26269.30 km² 减至 24340.05 km²,草地由 12.97 km² 减至 11.24 km²,水域由 4246.95 km² 减至 3694.52 km²,而建设用地由 3671.03 km² 增至 8919.11 km²。

2) 2000—2021 年,浙江省生态系统固碳服务总量减少了 2996.58 万 t,碳汇净收益为-17071.84 万美元,生态系统固碳服务分布呈现西南高、东北低的空间格局。

3) 基于 3 个情景的预测结果,2035 和 2050 年浙江省只有在生态保护情景下才能保持生态系统固碳服务的增加,分别增加 323.26 和 473.00 万 t,分别产生 7707.86 和 11183.91 万美元的碳汇净收益。在自然发展情景下,2035 和 2050 年浙江省生态系统固碳服务分别减少 1164.90 和 1616.51 万 t,分别造成 27753.93 和 38200.63 万美元的碳汇净损失。在耕地保护情景下,2035 和 2050 年浙江省生态系统固碳服务分别减少 1013.18 和 1616.11 万 t,分别造成 24138.49 和 38191.09 万美元的碳汇净损失。据此,拥有最高生态系统固碳服务量和碳汇净收益的生态保护情景是浙江省未来发展的最优情景。浙江省在未来发展中应合理规划土地利用结构,控制碳密度低的土地利用类型侵占碳密度高的生态用地,例如,采取遏制建设用地侵占林地、草地等措施,促进土地利用由低碳中和效益向高碳中和效益方向转移;同时,可采取减少化肥施用、保护性耕作等技术和政策举措增加土壤碳密度。总之,浙江省可以通过综合施策,不断优化土地利用结构,系统提升陆地生态系统固碳服务能力,在全国率先探索建立基于自然的碳中和解决方案,为全国实现碳中和目标提供示范样板。

责任编辑 杨 弘

参考文献

- [1] 杨丽雯, 董丽青, 张立伟, 等. 固碳服务供需平衡和服务流量化评估——以引黄入晋南干线为例. 资源科学, 2019, 41(3): 557-571
- [2] Houghton RA. Revised estimates of the annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use and land management 1850-2000. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 2003, 55: 378-390
- [3] 赵荣钦, 黄贤金, 揣小伟. 中国土地利用碳排放的研究误区和未来趋向. 中国土地科学, 2016, 30(12): 83-92
- [4] 葛全胜, 戴君虎, 何凡能, 等. 过去 300 年中国土地利用、土地覆被变化与碳循环研究. 中国科学(D 辑: 地球科学), 2008, 38(2): 197-210
- [5] 张颖, 李晓格, 温亚利. 碳达峰碳中和背景下中国森林碳汇潜力分析研究. 北京林业大学学报, 2022, 44(1): 38-47
- [6] 何源, 李星锐, 杨晓帆, 等. 内蒙古锡林郭勒盟典型草原固碳量及固碳潜力估算. 草地学报, 2021, 29(10): 2274-2285
- [7] 薛彩霞, 李园园, 胡超, 等. 中国保护性耕作净碳汇的时空格局. 自然资源学报, 2022, 37(5): 1164-1182
- [8] 中共中央国务院. 关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见 [EB/OL]. (2021-10-24) [2023-03-28]. www.gov.cn/zhengce/2021-10/24/content_5644613.htm
- [9] 中共中央国务院. 2030 年前碳达峰行动方案 [EB/OL]. (2021-10-26) [2023-3-28]. www.gov.cn/zhengce/content/2021-10/26/content_5644984.htm
- [10] 孙定钊, 梁嘉嘉. 基于改进 Markov-CA 模型的黄土高原土地利用多情景模拟. 地球信息科学学报, 2021, 23(5): 825-836
- [11] 李秀霞, 徐龙, 江恩赐. 基于系统动力学的土地利用结构多目标优化. 农业工程学报, 2013, 29(16): 247-254
- [12] 赵明松, 徐少杰, 邓良, 等. 基于 CLUE-S 模型的煤矿城市土地利用变化模拟. 农业机械学报, 2022, 53(5): 158-168
- [13] 谢凌凌, 许进龙, 臧俊梅, 等. 基于 Markov-FLUS 模型的广西土地利用变化模拟预测. 水土保持研究, 2022, 29(2): 249-254
- [14] Liu X, Liang X, Li X, et al. A future land use simulation model (FLUS) for simulating multiple land use scenarios by coupling human and natural effects. *Landscape and Urban Planning*, 2017, 168: 94-116
- [15] 王旭洋, 李玉强, 连杰, 等. CENTURY 模型在不同生态系统的土壤有机碳动态预测研究进展. 草业学报, 2019, 28(2): 179-189
- [16] Paramesh V, Kumar P, Nath AJ, et al. Simulating soil organic carbon stock under different climate change scenarios: A RothC model application to typical land-use systems of Goa, India. *Catena*, 2022, 213: 106129
- [17] 王天福, 龚直文, 邓元杰. 基于土地利用变化的陕西省植被碳汇提质增效优先区识别. 自然资源学报, 2022, 37(5): 1214-1232
- [18] 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. 中南林业科技大学学报, 2021, 41(3): 120-128
- [19] 郑贱成, 谢炳庚, 游细斌. 基于土地利用变化的广东省生境质量时空演变特征. 生态学报, 2022, 42(17): 6997-7010
- [20] Cao L, Kong F, Xu C. Exploring ecosystem carbon storage change and scenario simulation in the Qiantang River source region of China. *Science Progress*, 2022, 105: 003685042211131
- [21] 邱陈澜, 王彩侠, 章瑞, 等. 京津冀城市群生态空间固碳服务功能及其与景观格局的关系特征. 生态学报, 2022, 42(23): 9590-9603
- [22] 刘魏魏, 王效科, 逯非, 等. 全球森林生态系统碳储量、固碳能力估算及其区域特征. 应用生态学报, 2015, 26(9): 2881-2890
- [23] 张莉, 郭志华, 李志勇. 红树林湿地碳储量及碳汇研究进展. 应用生态学报, 2013, 24(4): 1153-1159
- [24] 朱文博, 张静静, 崔耀平, 等. 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
- [25] 浙江省统计局. 浙江省统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2022
- [26] 徐彩瑶, 王宁, 孔凡斌, 等. 森林生态产品价值实现对县域发展差距的影响: 以浙江省山区 26 县为例. 林业科学, 2023, 59(1): 12-30
- [27] Yang J, Huang X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019. *Earth System Science Data*, 2021, 13: 3907-3925
- [28] 自然资源部. 土地利用现状分类 [EB/OL]. (2017-11-01) [2023-3-28]. <http://c.gb6888.cn/bz/gb/showGb?type=online&hcno=224BF9DA69F053DA22AC758AAAADDEEAA>
- [29] 刘光旭, 王小军, 相爱存, 等. 赣江中上游地区土地利用变化空间分异与驱动因素. 应用生态学报, 2021, 32(7): 2545-2554
- [30] Liu X, Wang X, Chen K, et al. Simulation and prediction of multi-scenario evolution of ecological space based on FLUS model: A case study of the Yangtze River Economic Belt, China. *Journal of Geographical Sciences*, 2023, 33: 373-391
- [31] 王旭东, 姚尧, 任书良, 等. 耦合 FLUS 和 Markov 的快速发展城市土地利用空间格局模拟方法. 地球信息科学学报, 2022, 24(1): 100-113
- [32] 卿苗, 赵军, 冯超, 等. 1980—2030 年石羊河流域生态系统碳储存服务对土地利用变化的响应. 生态学报, 2022, 42(23): 1-12
- [33] 杨伟青, 张会兰. 基于 GeoSOS-FLUS 的涪江流域生态系统服务价值评估及多情景模拟. 水土保持研究, 2022, 29(5): 253-262
- [34] 杨露, 颜耀文, 宗乐丽, 等. 基于多目标遗传算法和 FLUS 模型的西北农牧交错带土地利用优化配置. 地球信息科学学报, 2020, 22(3): 568-579
- [35] Zhou J, Zhao Y, Huang P, et al. Impacts of ecological restoration projects on the ecosystem carbon storage of inland river basin in arid area, China. *Ecological Indicators*, 2020, 118: 106803
- [36] 王旭, 马伯文, 李丹, 等. 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

- [37] 揣小伟, 黄贤金, 郑泽庆, 等. 江苏省土地利用变化对陆地生态系统碳储量的影响. 资源科学, 2011, 33(10): 1932-1939
- [38] 周锐, 苏海龙, 王新军, 等. 基于 CLUE-S 模型和 Markov 模型的城镇土地利用变化模拟预测——以江苏省常熟市辛庄镇为例. 资源科学, 2011, 33(12): 2262-2270
- [39] 程先富, 谢勇. 基于 GIS 的安徽省土壤有机碳密度的空间分布特征. 地理科学, 2009, 29(4): 540-544
- [40] 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 [EB/OL]. (2022-09-19) [2022-12-12]. <https://doi.org/10.13227/j.hjlx.202204080>
- [41] 邓元杰, 姚顺波, 侯孟阳, 等. 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
- [42] Ricke K, Drouet L, Caldeira K, et al. Country-level social cost of carbon. *Nature Climate Change*, 2018, 8: 895-900
- [43] Zarandian A, Badamfirouz J, Musazadeh R, et al. Scenario modeling for spatial-temporal change detection of carbon storage and sequestration in a forested landscape in Northern Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2018, 190: 474
- [44] Sharp R, Tallis HT, Ricketts T, et al. InVEST User's Guide. CA, USA: Stanford University 2014
- [45] Detwiler RP, Hall CA. Tropical forest and the global cycles. *Science*, 1988, 239:42-47
- [46] 吕超群, 孙书存. 陆地生态系统碳密度格局研究概述. 植物生态学报, 2004, 28(5): 692-703
- [47] 于贵瑞, 朱剑兴, 徐丽, 等. 中国生态系统碳汇功能提升的技术途径: 基于自然解决方案. 中国科学院院刊, 2022, 37(4): 490-501
- [48] 徐晋涛, 易媛媛. “双碳”目标与基于自然的解决方案: 森林碳汇的潜力和政策需求. 农业经济问题, 2022(9): 11-23