

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

邓元杰^{1,2}, 姚顺波^{1,2}, 侯孟阳^{1,2}, 张童越¹, 鲁亚楠^{1,2},
龚直文^{1,2}, 王怡菲^{1,2}

(1. 西北农林科技大学经济管理学院, 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学
资源经济与环境管理研究中心, 杨凌 712100)

摘要: 陆地生态系统碳储量是表征生态系统碳储存服务的重要指标, 与土地利用变化之间存在着密切的关系。退耕还林还草工程使区域土地利用格局发生巨大变化, 并对生态系统碳储存服务造成了较大的影响。为了能简单快速的评估退耕还林还草工程对陆地生态系统碳储存服务所带来的影响, 以位于黄土高原丘陵沟壑区的子长县为例, 运用InVEST模型评估了退耕还林还草工程对陆地生态系统碳储量的影响, 进一步耦合InVEST模型和FLUS模型, 并设置四种不同的退耕还林还草实施情景, 预测子长县2037年陆地生态系统碳储量变化和碳汇产生的经济价值。研究发现: (1) 子长县退耕还林还草工程实施效果显著, 17年间共有31627.98 hm²耕地退耕为林地和草地, 境内的林草覆盖率由2000年的53.26%增长至2017年的64.20%; (2) 退耕还林还草工程的实施显著提升了子长县陆地生态系统碳储存服务, 碳储量由2000年的39.19×10⁶ t增长至2017年42.34×10⁶ t, 增加量集中在工程实施主要阶段(2000—2008年); (3) 未来子长县若继续实施退耕还林还草工程, 其生态系统碳储存服务会得到进一步提升, 且会获得一定的碳汇经济价值。预计到2037年子长县在退耕还林还草工程实施A、B、C、D四种情景下的陆地生态系统碳储量将分别达到: 43.78×10⁶ t、44.10×10⁶ t、44.32×10⁶ t和44.54×10⁶ t, 并将由此获得碳汇经济价值净收益分别为1627.88万美元、1979.89万美元、2231.39万美元和2471.67万美元。耦合InVEST-FLUS模型, 不但能利用InVEST模型简单快速的对陆地生态系统碳储量进行评估, 而且还能基于FLUS模型对未来土地利用变化情景下的陆地生态系统碳储量和碳汇经济价值做出测算。

关键词: 退耕还林还草工程; 陆地生态系统碳储存量; InVEST模型; FLUS模型; 子长县

生态系统服务(Ecosystem Services)是人类从生态系统中所获得的各种惠益^[1]。联合国在2005年发布的千年生态系统评估报告中明确指出生态系统碳储存服务是重要的生态系统服务之一^[2], 其对受CO₂浓度驱动的气候变化具有重要影响, 在调节气候上起着至关重要的作用^[3]。而陆地生态系统碳储量作为表征生态系统碳储存服务最重要的指标, 其在全球碳循环中起着非常重要的作用^[4]。土地利用变化是造成陆地生态系统碳储量变化的重要因素之一^[5], 土地利用变化使得陆地生态系统原有的土地覆被格局、生态系统结构、过程和功能都发生改变, 影响着生态系统的物质循环和能量流动^[4,6]。一方面土地利用变

收稿日期: 2018-12-25; 修订日期: 2019-10-24

基金项目: 林业公益性行业科研专项(201504424); 教育部人文社会科学重点研究基地基金项目(14JJD790031)

作者简介: 邓元杰(1992-), 男, 四川内江人, 博士研究生, 研究方向为资源经济与环境管理。

E-mail: dengyuanjie@nwfafu.edu.cn

通讯作者: 姚顺波(1964-), 男, 湖南益阳人, 博士, 教授, 研究方向为林业政策评估、资源经济与环境管理。

E-mail: yaoshunbo@163.com

化会导致陆地生态系统释放出大量的CO₂，使陆地生态系统逐渐演变成一个巨大的碳源；另一方面，土地利用变化也能使CO₂储存到植被和土壤中，使陆地生态系统的碳汇能力得到不断增强^[7,8]。因此，研究土地利用变化对陆地生态系统碳储量的影响具有十分重要的意义。

退耕还林还草工程（以下简称“工程”）自1999年在四川、陕西、甘肃三省试点开展，再到2002年在全国全面启动、2014年新一轮工程启动，至今已过了20年。黄土高原地区作为工程实施的核心地区，区内地表覆盖在20年来发生了前所未有的大尺度、转换性改变^[9]，并对陆地生态系统碳循环产生了深远的影响^[10]。WANG等^[11]、姚平等^[12]分别以河南省和西南地区的工程建设数据和森林资源清查资料为基础，建立作物生长模型，探究工程实施对森林碳储量的影响，结果表明工程实施使得研究区森林碳汇能力得到了明显提升；刘淑娟等^[13]和赵瑞等^[14]分别以桂西北典型喀斯特峰丛洼地和广西平果县为研究区，运用野外样地调查法，探究工程实施对植被碳储量的影响，结果表明工程的实施使得研究区土壤和植被碳储量均得到了提升。虽然前两种方法在研究中取得了一定的成果，然而基于清单资料建立作物生长模型对碳储量进行分析，难以实现对空间异质性问题的定量化研究；野外样地采样法虽然得到的结果准确，但是其过程费时费力，限制了其在大范围研究区上的应用。为了解决以上问题，部分学者开始将地理信息系统和遥感模型用于评估工程实施对陆地生态系统碳储量的影响。如LIU等^[15]以全国为研究区，运用IBIS模型（Integrated Biosphere Simulator, IBIS）评估工程实施对碳汇的贡献，结果表明工程实施使得全国的碳汇能力得到了有效提升，并呈现出了一定的空间差异；ZHOU等^[16]以黄土高原丘陵沟壑区的安塞县为研究区，运用GEMS模型（General Ensemble Biogeochemical Modeling System, GEMS）评估工程实施对安塞县陆地生态系统碳循环的影响，结果表明工程实施有效提升了安塞县的碳汇能力。然而，虽然运用IBIS和GEMS模型较好地解决清单资料法和野外样地采样法存在的不足，但是模型所需输入要素繁杂，通用性较差，弱化了土地利用变化对陆地生态系统碳储量的直接影响。

由美国斯坦福大学、世界自然基金会和大自然保护协会联合开发的InVEST模型（Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs, InVEST）由一系列模块和算法组成，涵盖多种生态系统服务过程，其模型中的Carbon模块能在空间上直接将土地利用变化与陆地生态系统碳储量动态变化结合起来，使其既能评估研究区域由过去到现在因土地利用变化而对陆地生态系统碳储量造成的影响，还能用于模拟未来土地利用变化情景下陆地生态系统碳储量的变化。并且由于模块计算所需输入参数简单，通用性和稳定性高，并具有较高可信度，得以广泛应用于探究土地利用变化对陆地生态系统碳储量的影响分析中。如徐自为等^[17]、范立红等^[18]、郜红娟等^[19]、张影等^[20]运用InVEST模型研究县域、流域等不同区域土地利用变化对陆地生态系统碳储量的影响；HE等^[21]、JIANG等^[22]、LYU等^[23]和WANG等^[24]则进一步分别将LUSD-urban、CLUE-S、SLEUTH-3r和CA-Markov模型模拟研究区域未来不同情景下的土地利用变化格局，并在此基础上耦合InVEST模型评估不同情景下由土地利用变化所引起的陆地生态系统碳储量的变化。

从现有的研究来看，主要存在以下三点亟待拓展的方向。一是国内外鲜有学者使用InVEST模型研究由退耕还林还草工程实施所引起的土地利用变化对陆地生态系统碳储量造成的影响。二是在InVEST模型与模拟土地利用变化模型进行耦合应用上，现有研究仅将模型运用在了未来城市的扩展模拟上，导致了模型模拟时仅考虑了城市扩张，而非多

种用地类型之间的转换,忽视了多种土地相互转化过程的相互影响^[25]。此外,上述模型在土地利用预测分配过程中只考虑概率占优的土地利用类型,忽略了土地利用类型间的相互竞争关系,剔除了非优势土地利用的分配机会,使得模拟结果难以获得与现实土地利用分布相似的结果^[26-28]。而FLUS模型(Future Land Use Simulation Model, FLUS)提出的一种基于轮盘赌选择的自适应惯性竞争机制,能够很好地解决上述模型存在的问题^[28],并且FLUS模型采用了能够有效处理非线性关系的ANN模型,该模型使得土地利用类型间相互转化的复杂过程变得更为简单^[29],进而能有效提升多种土地利用类型间的转换概率,使未来多种土地利用类型在空间上的分布更为准确、合理。三是在陆地生态系统碳汇服务的经济价值已被广泛认识的全球市场经济形势下^[30],国内外鲜有学者评估研究区域在未来某一时段内由土地利用变化产生的碳汇量所带来的社会经济价值。基于此,本文选择全国退耕还林试点示范县,位于黄土高原丘陵沟壑区的子长县为例,基于工程实施后的四期土地利用数据(2000年、2008年、2013年、2017年),首先运用InVEST模型评估由工程实施所引起的土地利用变化对子长县陆地生态系统碳储量的影响,其次将InVEST模型与FLUS模型进行耦合,评估子长县2017—2037年土地利用格局在四种不同工程实施情景影响下的陆地生态系统碳储量潜力和碳汇经济价值。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究区概况

子长县位于黄土高原中部,北依横山,东接子洲、清涧,南连延川、延安,西邻安塞、靖边,东西长72 km,南北宽55.7 km,地势由西北向东南倾斜,海拔922~1563 m,总面积2405 km²(图1)。境内属典型的黄土高原丘陵沟壑区,暖温带半干旱大陆性季风气候。境内脊梁起伏,沟壑纵横,脊梁沟谷地约占总面积的94.6%。年平均气温9.1℃,

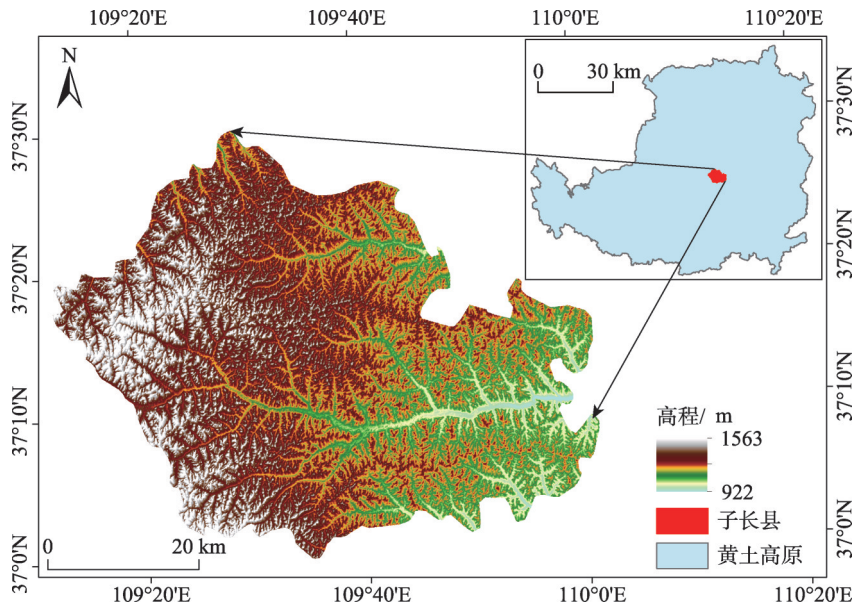


图1 子长县位置示意图

Fig. 1 Location of Zichang county

降水量 514.7 mm, 无霜期 175 天。有清涧河、无定河、延河三大黄河支流水系。1999 年以来, 按照党中央、国务院“再造一个山川秀美的西部地区”和“退耕还林(草)、封山绿化、个体承包、以粮代赈”十六字政策措施要求, 子长县积极实施退耕还林还草工程建设, 取得了显著成效。

1.2 数据来源及处理

本文所使用的子长县 2000 年、2008 年、2013 年和 2017 年土地利用数据来源于地理国情监测云平台 (<http://www.dsac.cn/>), 其空间分辨率为 30 m, 并根据子长县 4 个时点的土地利用数据和工程实施的实际情况, 将子长县工程分别分为工程主要阶段(2000—2008 年)、工程管护阶段(2008—2013 年)、新一轮工程实施阶段(2013—2017 年)。土地利用数据一级分类结果综合评价精度达到 94.3% 以上, 二级类型分类综合精度达 91.2% 以上^[31]。本文土地利用类型根据中国科学院土地利用/覆被标准^[32], 将子长县土地利用类型重新分为耕地、林地、草地、水域和城乡工矿建设用地五类(图 2)。基础地理信息数据包括子长县行政边界、道路、铁路、河流、农村居民点来源于国家基础地理信息中心公布的 1:100 万全国基础地理数据库 (<http://www.webmap.cn>), 子长县 2013 年和 2017 年城乡工矿建设用地数据提取自子长县同时期土地利用格局图。气象数据来源于中国气象数据网 (<http://data.cma.cn/>)。高程数据来源于从地理空间数据云 (<https://www.gscloud.cn/search>) 上下载的 ASTER GDEM V2 版本数据, 坡度和坡向数据集为基于高程数据使用 ArcGIS 软件计算所得。本文所使用的所有数据空间分辨率均为 30 m, 空间坐标系统均为 Krasovsky_1940_Albers。

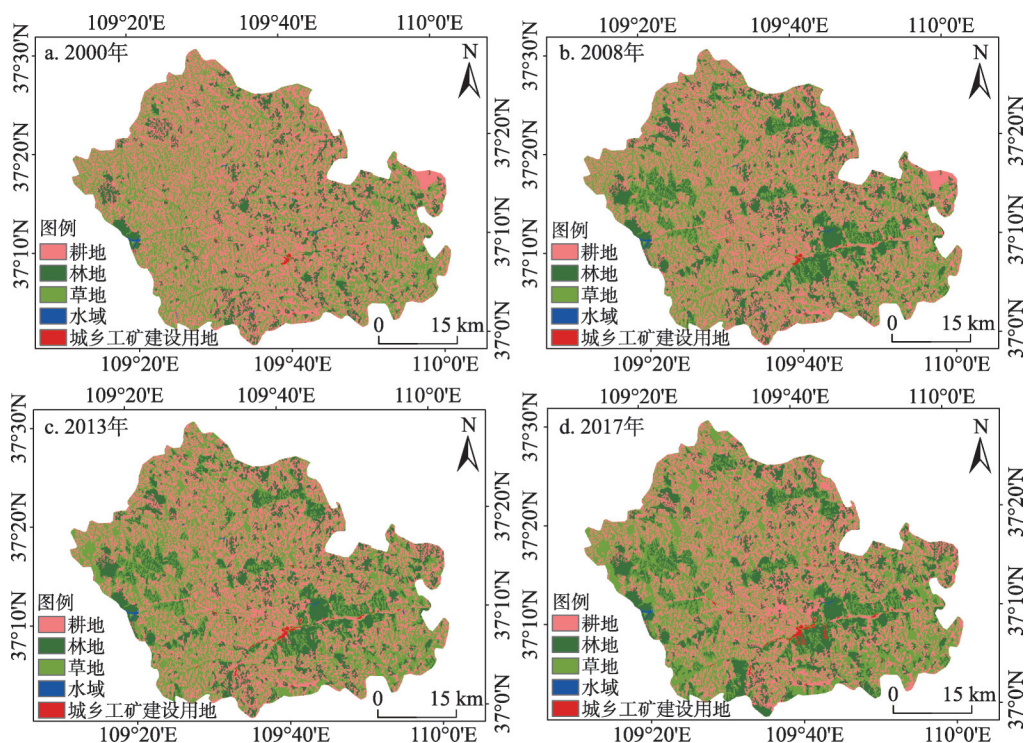


图 2 2000 年、2008 年、2013 年、2017 年子长县土地利用类型

Fig. 2 Land use type map of Zichang county in 2000, 2008, 2013 and 2017

1.3 研究框架

本文将InVEST模型和FLUS模型耦合的基本逻辑框架主要由三大部分组成^[22] (图3): (1) 设定未来退耕还林还草工程实施情景: 运用Markov链为子长县2017—2037年土地利用变化设定四种不同的工程实施情景, 并求解得到2037年子长县在未来四种不同工程实施情景下的用地类型数量。(2) 未来土地利用变化模拟: 使用FLUS模型将四种不同工程实施情景下的用地类型数量在空间上进行模拟分配, 得到子长县2037年在四种不同工程实施情景下的土地利用格局图。(3) 陆地生态系统碳储量和碳汇价值评估: 运用InVEST模型首先测算出子长县2000年、2008年、2013年和2017年四期的陆地生态系统碳储量, 其次测算出子长县2037年在四种不同工程实施情景下的陆地生态系统碳储量和碳汇价值。

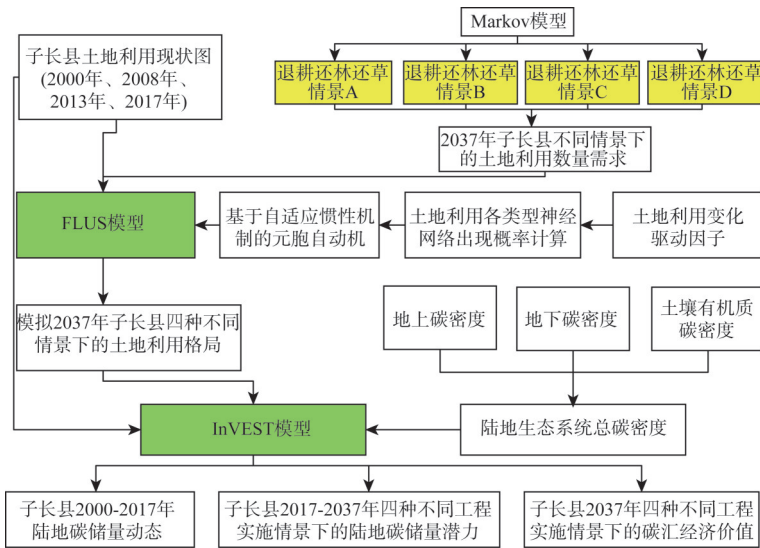


图3 InVEST-FLUS耦合模型研究框架

Fig. 3 The framework of InVEST-FLUS models

1.4 Markov模型

Markov模型可以根据事物的一种状态向另外一种状态转化的概率预测未来的状态概率分布。在土地利用变化研究中, 运用Markov模型, 基于研究区土地利用转移的概率矩阵, 为研究区设定未来的土地利用变化发展情景以及预测各用地类型在相应情景下的数量已经得到了广泛运用。本文基于子长县2014—2017年的土地利用转移概率矩阵, 通过调整耕地向林地和耕地向草地的转移概率为子长县设定了四种退耕还林还草工程情景: (1) 退耕还林还草情景A: 保持2013—2017年土地利用转移矩阵中耕地向林地和草地的转移概率不变; (2) 退耕还林还草情景B: 将耕地向林地和草地的转移概率分别提高20%和10%; (3) 退耕还林还草情景C: 将耕地向林地和草地的转移概率分别提高35%和20%; (4) 退耕还林还草情景D: 将耕地向林地和草地的转移概率分别提高50%和30%。Markov模型的表达式为:

$$X(k+1) = X(k) \times P \tag{1}$$

式中: $X(k)$ 、 $X(k+1)$ 分别表示趋势分析与预测对象在 $t=k$ 、 $t=k+1$ 时刻的状态向量; P 表示一步转移概率矩阵。

1.5 FLUS模型

FLUS模型主要由两个模块组成，分别为基于神经网络的适宜性概率计算模块和基于自适应惯性机制的元胞自动机模块。首先，基于子长县2017年土地利用类型图和选取的影响土地利用变化的多种驱动因子，运用FLUS模型的人工神经网络模块计算出2037年子长县各种用地类型在研究范围内的适宜性概率；其次，运用FLUS模型中的基于轮盘赌选择的自适应惯性竞争机制解决多种用地类型在自然作用和人类活动共同影响下发生相互转换的不确定性与复杂性，进而计算出综合规则^[33]；最后，运用FLUS模型基于该规则和子长县2037年四种不同工程实施情景下的用地类型数量，运用元胞自动机模拟出四种不同工程实施情景下的土地利用空间分布格局。

1.5.1 土地利用变化驱动因子确定

土地利用变化是各类型土地自身理化条件和自然、社会、经济等内外因共同作用的结果^[34]。本文根据子长县实际情况、FLUS模型的因子需求和研究目的，主要从影响土地利用变化的自然因子和社会经济因子两个主要方面出发，选取坡度、坡向、到城镇距离、到农村居民点距离等共10个因素（表1、图4）。

表1 土地利用变化驱动因子数据说明

Table 1 Data description of driving factors of land use change

数据类型	数据名称	年份	数据处理与说明	单位
自然因子	高程	2000	ASTER GDEM V2	m
	坡度			(°)
	坡向			(°) (方位角)
	年平均气温	2013、2017	使用ArcGIA 0.5软件插值分析工具中的反距离权重法计算获得	°C
	年平均降水量			mm
社会经济因子	到河流距离	2015	使用ArcGIA 0.5软件距离工具下的欧氏距离计算获得	m
	到铁路距离			m
	到公路距离			m
	到农村居民点距离			m
	到城镇距离	2013、2017		m

1.5.2 基于人工神经网络的适宜性概率计算

神经网络通常包含输入层、隐藏层、输出层三个隐含层。其具体公式如下：

$$sp(p, k, t) = \sum_j \omega_{j,k} \times \text{sigmoid}\{net_j(p, t)\} = \frac{\sum_j \omega_{j,k}}{1 + e^{-net_j(p, t)}} \quad (2)$$

式中： $sp(p, k, t)$ 为第 k 种用地类型在像元 p 、时间 t 上的适宜性概率； $\omega_{j,k}$ 是隐藏层与输出层间的权值，会在训练中调整； $net_j(p, t)$ 表示在第 j 个隐藏层输入层神经元在像元 p 、训练时间 t 上所接收到的信号； $\text{sigmoid}()$ 是隐藏层到输出层的激励函数。对于ANN输出的适宜性概率 $\text{sigmoid}()$ ，在迭代时间 t 像元 p 上，各类用地的适宜性概率的和恒定为1，即：

$$\sum_k sp(p, k, t) = 1 \quad (3)$$

1.5.3 自适应惯性竞争机制

自适应惯性竞争机制，其核心是自适应惯性系数，每种地类的惯性系数根据现有土地需求与土地数量的差异决定，并在迭代中自适应调整，从而使各类用地的数量向目标

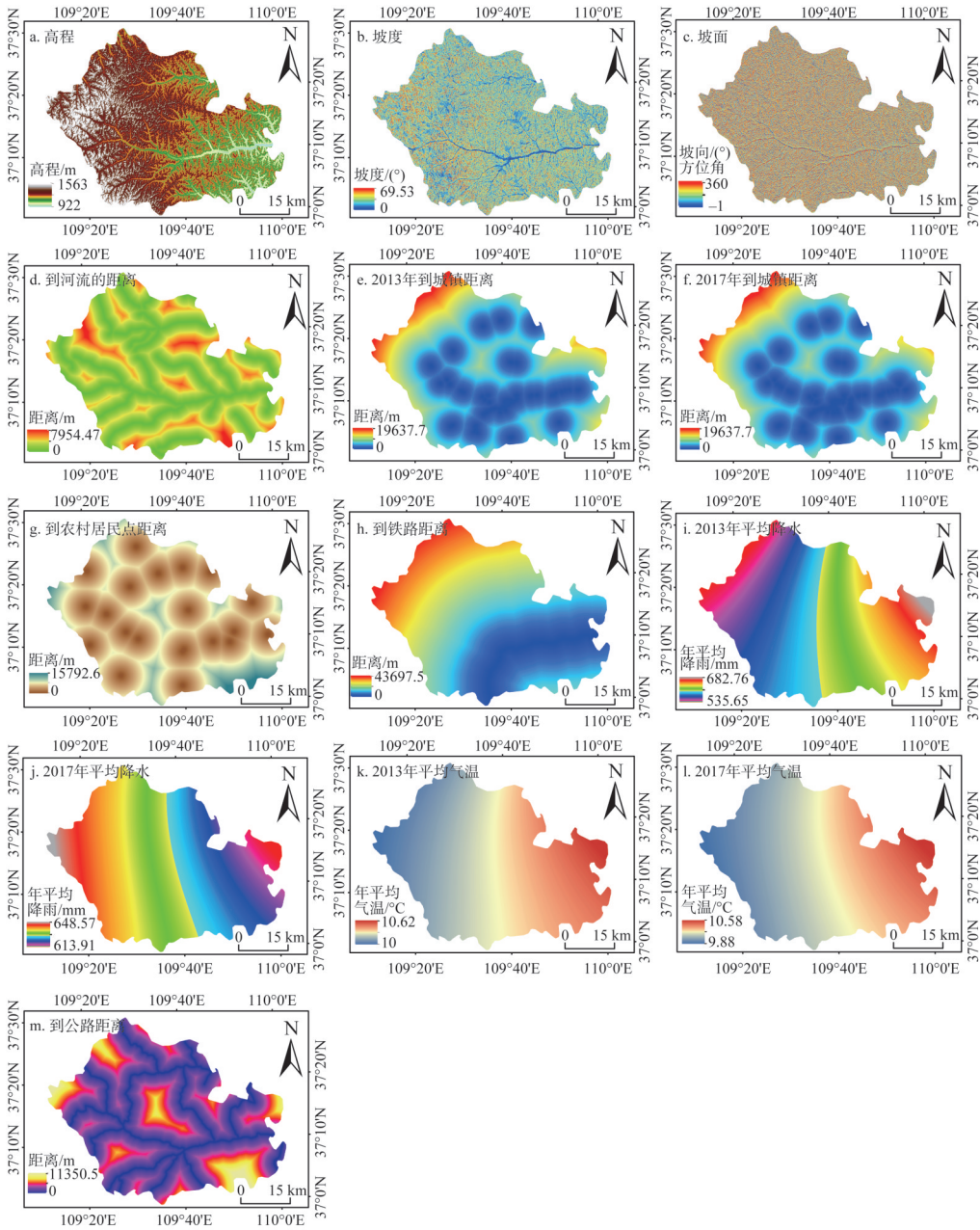


图4 子长县土地利用变化驱动因子

Fig. 4 Driving trends of land use change in Zichang county

发展^[27,28]。第 t 种地类在 l 时刻的自适应关系系数 $Inertia_t^l$ 为:

$$Inertia_t^l = \begin{cases} Inertia_t^{l-1} & |D_t^{l-2}| \leq |D_t^{l-1}| \\ Inertia_t^{l-1} \times \frac{D_t^{l-2}}{D_t^{l-1}} & 0 > D_t^{l-2} > D_t^{l-1} \\ Inertia_t^{l-1} \times \frac{D_t^{l-1}}{D_t^{l-2}} & D_t^{l-1} > D_t^{l-2} > 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中： D_t^{l-1} 、 D_t^{l-2} 分别为 $l-1$ 、 $l-2$ 时刻第 k 种用地类型的栅格数与需求数量之差。

根据以上步骤，分别计算出每个栅格的总概率，通过CA迭代，将各用地类型分配到栅格中。栅格 p 在 l 时刻转化为用地类型 t 的总概率 $TProb_{k,t}^l$ 可表示为：

$$TProb_{k,t}^l = P(k, t, l) \times \Omega_{k,t}^l \times Inertia_t^l \times (1 - sc_{c \rightarrow t}) \quad (5)$$

式中： $sc_{c \rightarrow t}$ 为土地利用类型 C 转为类型 T 的成本； $1 - sc_{c \rightarrow t}$ 表示发生转化的难易程度； $\Omega_{k,t}^l$ 为邻域作用，其公式为：

$$\Omega_{k,t}^l = \frac{\sum_{N \times N} con(c_k^{l-1} = t)}{N \times N - 1} \times \omega_t \quad (6)$$

式中： $\sum_{N \times N} con(c_k^{l-1} = t)$ 表示在 $N \times N$ 的Moore邻域窗口，上一次迭代结束后第 k 种地类的栅格总数；本文中取 $N=3$ ； ω_t 为各类用地的邻域作用的权重。

1.5.4 模型可行性验证

模型的验证可以用来检验模拟的情况和调整模拟参数，以确保模型可以适用于研究区域的土地利用变化模拟。本文的模型可行性验证采用Kappa系数和总体精度(OA)来验证FLUS模型的模拟精度。其中，Kappa系数及OA均介于0~1，值越接近于1，模拟精度越好，相反则越差。通常，当Kappa>0.5时，模型模拟精度较差；当0.5<Kappa≤0.75时，模型模拟精度一般；当0.75<Kappa≤1时，模型模拟精度较高^[35,36]。

1.6 InVEST模型

1.6.1 评估陆地生态系统碳储量和碳流失量

InVEST模型中计算陆地生态系统碳储量的Carbon模块假设每个土地利用类型生态系统对应一个由地上生物碳密度、地下生物碳密度、死亡有机质碳密度、土壤有机质碳库碳密度组成的该地区陆地生态系统的总碳密度^[37]，但由于死亡有机质碳密度数据难以获取，故本文仅考虑三大碳库碳储量。碳储量的基本公式为：

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

$$C_{tot} = \sum_{i=1}^n C_i \times S_i \quad (8)$$

式中： i 为某种土地利用类型； $C_{i-above}$ 为土地利用类型的地上碳密度(t/hm^2)； $C_{i-below}$ 为地下碳储量(t/hm^2)； C_{i-soil} 为土壤碳储量(t/hm^2)； C_{tot} 为陆地生态系统总的碳储量(t)； S_i 为土地利用类型 i 的面积(hm^2)； n 为土地利用类型的数量，本文为5。

1.6.2 生态系统碳密度数据确定

根据许泉等^[38]、解宪丽等^[39]相关研究，分别获得了全国水平耕地、林地和草地的地上碳密度；根据解宪丽等^[39]研究确定了全国水平耕地、林地和草地的地下碳密度；根据李克让^[40]、马钦彦等^[41]研究，确定了全国水平耕地、草地和林地的土壤碳密度；根据揣小伟等^[42]研究得到江苏省水域、城乡工矿建设用地的地上碳密度和土壤碳密度，地下碳密度均默认为0。然后，通过参考朱文博等^[43]和全国气象数据网上提供的数据，获得全国、江苏省和子长县多年均温分别为9℃、15.7℃、9.64℃，降水量分别为628mm、1040.4mm、479mm。最后采用陈光水等^[44]、Giardina等^[45]、Alam等^[46]研究中的关于生物量碳密度和土壤碳密度分别与气温和降水量的关系模型，修正得到子长县碳密度数据(表2)。

1.6.3 评估未来不同土地利用情景下的碳汇经济价值

使用InVEST模型对陆地生态系统碳储量和碳汇量的经济价值进行评估主要由三方面

构成。首先需要知道当前研究区域所对应的每吨碳排放的社会成本，第二个是未来收益更加偏好当前社会直接收益好处的市场贴现率，第三个是碳价格年际变化率。在InVEST模型计算每个栅格中在一段时间内碳汇的经济价值公式如下：

$$value_seq_x = V \frac{sequest_x}{yr_fut - yr_cur} \sum_{t=0}^{yr_fut - yr_cur - 1} \frac{1}{\left(1 + \frac{r}{100}\right)^t \left(1 + \frac{c}{100}\right)^t} \quad (9)$$

式中： $value_seq_x$ 表示在未来土地利用变化情景中所固碳栅格的碳汇经济价值； x 表示固碳栅格； V 表示固持每吨碳的价值（美元）； r 表示市场折现率（%），反映了社会对当前收益的偏好，而不是更加偏好于未来的收益； t 表示固持每吨碳的价值年变化率（%）； yr_cur 表示用于当前土地利用情景下的陆地生态系统碳储量，本文为2017年子长县陆地生态系统碳储量； yr_fut 表示用于计算未来土地利用情景下的陆地生态系统碳储量，本文为2037年子长县四种不同工程实施情景下的陆地生态系统碳储量； $sequest_x$ 表示当前和未来土地利用情景下每个栅格中的碳汇量或碳流失量。Ricke等^[47]在研究中指出，当前中国的碳排放社会成本应该确定为24美元/t；2017—2037年的碳汇经济价值市场贴现率根据亚洲发展银行在对项目进行评估时采用10%~12%的贴现率^[37]，本文最终将贴现率确定为10%；碳排放社会成本年际变化率通过参考前人的研究^[48]将其设置为不变，即为0。

2 结果分析

2.1 子长县土地利用变化特征

2000—2017年，受工程实施影响，子长县土地利用变化主要以耕地减少、林地和草地增加为主要特征，其中耕地减少26892 hm²，林地增加23191 hm²，草地增加2996 hm²，水域减少44 hm²，城乡工矿建设用地增加750 hm²。从工程实施的三个阶段来看，在工程实施主要阶段（2000—2008年）主要以耕地减少、林地增加为主要特征。这一时期耕地共减少了15922 hm²，为耕地面积减少最多的阶段，林地共增加20299 hm²，为林地面积增加最多的阶段。工程实施管护阶段（2008—2013年）主要以耕地减少、草地增加为主要特征。耕地面积继续呈下降趋势，但下降幅度减少，耕地在这一阶段共减少了6800 hm²，草地共增加了5990 hm²，为草地面积增加最多的阶段。新一轮工程实施阶段（2013—2017年）以耕地减少，林草地面积增加为主要特征。耕地面积减少了4170 hm²，林地和草地面积分别增加了2398 hm²和1440 hm²。城乡工矿建设用地在三个阶段均呈增加态势，但是面积增加主要集中在工程管护阶段（371 hm²）和新一轮工程实施阶段（332 hm²），水域面积在3个阶段变化较小，总体呈小幅下降态势。

依据设置的四种不同工程实施情景下土地利用转移概率矩阵和2017年子长县各用地类型所占土地利用总面积的百分比，运用Matlab 2016 a软件计算得到子长县2037年在四种不同工程实施情景下各用地类型数量（表3）。由表3可得，2017—2037年耕地面积在情景A下最多，为63974 hm²，而由于受到不同退耕强度的影响，耕地面积在情景D下最

表2 子长县各土地利用类型碳密度

土地利用类型	$C_{i-above}$	$C_{i-below}$	C_{i-soil}
耕地	14.47	37.08	99.45
林地	19.48	53.25	217.33
草地	16.22	39.74	91.74
水域	0.02	0	60.56
城乡工矿建设用地	0	0	54.51

表3 2037年子长县四种不同退耕还林还草工程实施情景土地类型预测面积

Table 3 Predicted land type of four scenarios of GFPG in Zichang county in 2037

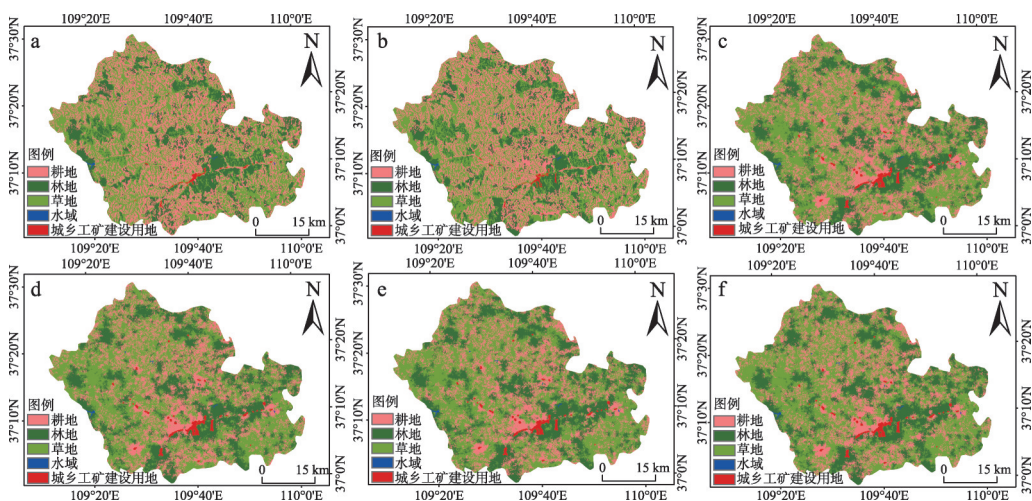
(hm²)

退耕还林还草情景	耕地	林地	草地	水域	城乡工矿建设用地
2017年	84376	47853	105885	249	1111
退耕还林还草情景A	63974	59570	112742	230	2959
退耕还林还草情景B	60920	61841	113535	230	2948
退耕还林还草情景C	58528	63468	114310	230	2939
退耕还林还草情景D	56198	65025	115091	230	2930

少, 预计到2037年为56198 hm²。林地和草地在未来20年内均呈不断增长态势, 其中林地和草地在情景A下面积最少, 预计分别为59570 hm²和112742 hm², 而在情景D下将会达到最多, 预计分别为65025 hm²和115091 hm²。城乡工矿建设用地在未来20年内将会继续保持持续增长态势, 其预计数量在情景A下最多, 在情景D下最少, 然而从整体来看, 2037年城乡工矿建设用地的数量在四种不同的土地利用情景下差异不大。水域在未来20年内, 将会呈小幅度下降趋势, 预计到2037年, 水域面积在四种不同工程实施情景下均为230 hm²。

2.2 FLUS模型精度检验及预测模拟

运用FLUS模型, 基于子长县2013年土地利用数据和选取的10个土地利用变化驱动因子, 模拟了子长县2017年土地利用情景(图5a), 经与2017年实际土地利用状况对比发现(图5b), Kappa指数为0.818, OA指数为0.854, 表明模型精度较高, 可适用于本文对子长县未来土地利用情景模拟的要求。因此, 基于Markov模型求解得到的子长县2037年四种退耕强度情景下的土地利用数量, 运用FLUS模型, 以2017年土地利用现状图为基础, 结合选取的10个影响土地利用变化的驱动因子, 在相应的准则控制下, 对2037年子长县四种退耕情景下的土地利用布局进行模拟(图5c~图5f)。



注: a为2017年土地利用情景模拟图, b为2017年土地利用现状图, c为2037年退耕还林还草情景A模拟图, d为2037年退耕还林还草情景B模拟图, e为2037年退耕还林还草情景C模拟图, f为2037年退耕还林还草情景D模拟图。

图5 子长县各类型情景模拟

Fig. 5 Scenarios of Zichang county

2.3 陆地生态系统碳储量动态变化

2000年、2008年、2013年和2017年子长县四个时期的陆地生态系统碳储量总量分别为 39.19×10^6 t、 42.02×10^6 t、 42.04×10^6 t和 42.34×10^6 t，地均陆地生态系统碳密度分别为 163.65 t/hm²、 175.47 t/hm²、 175.55 t/hm²和 176.79 t/hm²（图6）。17年间子长县陆地生态系统总碳储量呈持续增加趋势，土地利用类型之间的转化促使陆地生态系统碳储量净增加 3.15×10^6 t，增长率为8.03%。从陆地生态系统碳储量增加的不同阶段可得，陆地生态系统碳储量在工程实施主要阶段（2000—2008年）增长最为显著，8年间共净增加 2.83×10^6 t，增长率为7.23%，增加量占子长县陆地生态系统总碳储量增加总量的90%。然而，陆地生态系统碳储量在工程实施管护阶段（2008—2013年）仅增加了 0.02×10^6 t，增加率仅为0.04%，增速明显放缓。不过随着新一轮工程的实施（2013—2017年），陆地生态系统碳储量增长了 0.30×10^6 t，增加率为0.30%，增速出现上升。

从不同土地利用类型碳储量可得，耕地、林地和草地是子长县最为重要的碳库，三种土地利用类型的固碳总量占有土地利用类型固碳总量的99%以上。2015年，草地为固碳量最多的地类（ 15.99×10^6 t），林地（ 32.73×10^6 t）和耕地（ 29.39×10^6 t）位列二三位，城乡工矿建设用水域为固碳最少的土地利用类型，分别仅为 0.14×10^6 t和 0.04×10^6 t（图7）。从各土地利用类型的固碳变化趋势可得，退耕还林还草工程实施的17年间，耕地固碳量呈持续下降趋势，17年间减少了 3.97×10^6 t，下降率为24.17%；林地城乡工矿建设用水域固碳量均呈上升趋势，17年间固碳量分别增加了 6.73×10^6 t和 0.04×10^6 t，增长率分别为94.04%和207.88%；草地固碳量呈先减少后增加的趋势，在第一轮工程实施前期碳储量减少了 0.67×10^6 t，而后在第一轮工程实施后期和第二轮工程实施期间碳储量增长了 1.12×10^6 t；水域固碳量在17年间基本保持不变，为 0.02×10^6 t。

2017—2037年，子长县的陆地生态系统碳储量在四种工程实施情景下均呈增长态势，四种工程实施情景下的陆地生态系统碳储量在2037年将会分别达到 43.78×10^6 t（情景A）、 44.10×10^6 t（情景B）、 44.32×10^6 t（情景C）、 44.54×10^6 t（情景D），相比于2017年分别依次增长了 1.45×10^6 t（情景A）、 1.76×10^6 t（情景B）、 1.99×10^6 t（情景C）、 2.20×10^6 t（情景D）。单位土地固碳能力随着工程的继续施行也得到了不

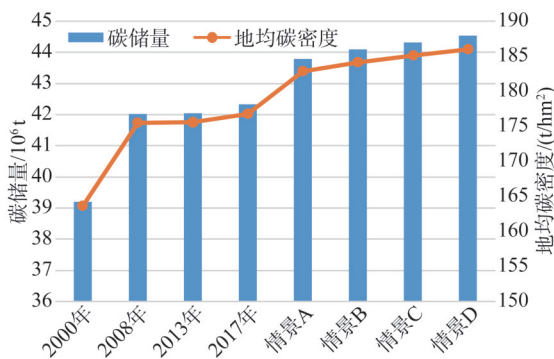


图6 2000—2017年子长县碳储量和地均碳密度变化

Fig. 6 Variation of carbon storage and average carbon density in Zichang county from 2000 to 2017

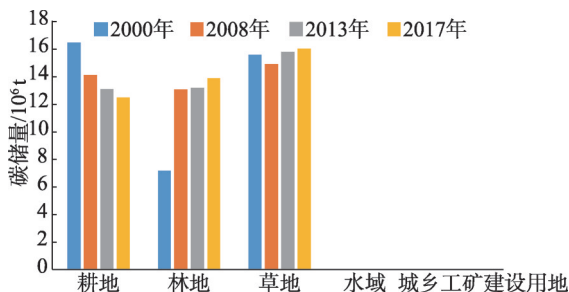


图7 2000—2017年子长县各土地利用类型下的碳储量变化

Fig. 7 Carbon storage changes under various land use types in Zichang county, 2000-2017

断增强，到2037年子长县在四种不同工程实施情景下的地均陆地生态系统碳密度将会依次分别到达182.84 t/hm²、184.14 t/hm²、185.08 t/hm²、185.97 t/hm²（图6）。由图8可得，2017—2037年，子长县在四种工程实施情景下可分别获得碳汇4.31×10⁶ t（情景A）、4.53×10⁶ t（情景B）、4.70×10⁶ t（情景C）、4.88×10⁶ t（情景D），同时分别导致碳损失2.87×10⁶ t（情景A）、2.76×10⁶ t（情景B）、2.71×10⁶ t（情景C）、2.68×10⁶ t（情景D），其中由耕地和草地转换为林地为促进陆地生态系统碳储量增加的主要原因，四种工程实施情景下由耕地和草地向林地转化可获得的碳汇量分别为4.23×10⁶ t（情景A）、4.44×10⁶ t（情景B）、4.62×10⁶ t（情景C）、4.80×10⁶ t（情景D），分别占碳汇总量的97.96%、98.15%、98.29%、98.41%；同时，林地面积减少也是导致碳损失最主要的原因，四种工程实施情景下因林地向耕地和草地转化所导致的碳损失量分别为2.51×10⁶ t（情景A）、2.40×10⁶ t（情景B）、2.35×10⁶ t（情景C）、2.31×10⁶ t（情景D），分别占碳损失总量的87.44%、86.91%、86.64%、86.35%。

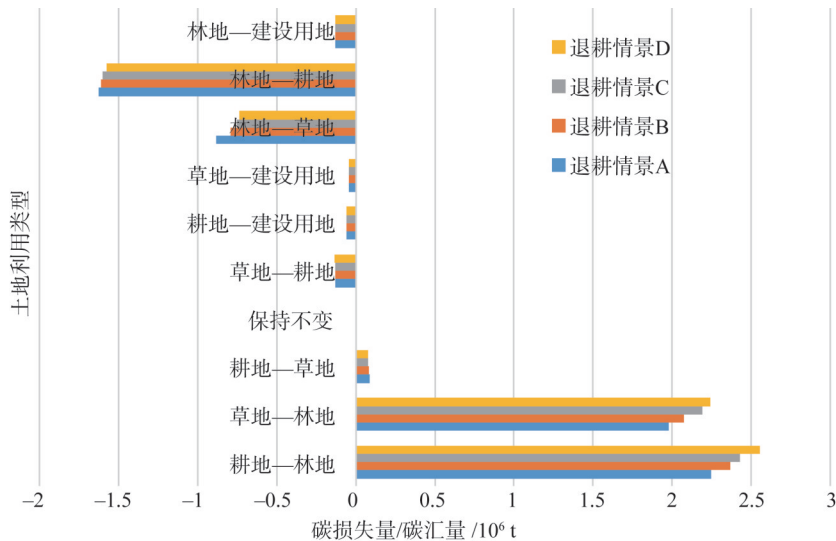


图8 2017—2037年子长县土地利用转化所引起的陆地生态系统碳储量变化

Fig. 8 Changes of terrestrial ecosystem carbon storage caused by land use transformation in Zichang county from 2017 to 2037

2037年子长县在四种不同情景下由碳储量增加可获得碳汇经济价值分别为4847.66万美元（情景A）、5085.86万美元（情景B）、5280.07万美元（情景C）和5480.90万美元（情景D），碳损失经济价值分别为3219.78万美元（情景A）、3105.97万美元（情景B）、3048.68万美元（情景C）和3009.23万美元（情景D），由碳汇经济价值减去碳损失经济价值即为最终可获得的碳汇经济价值净收益，2037年子长县在四种工程实施情景下可获得的碳汇经济价值净收益分别为1627.88万美元（情景A）、1979.89万美元（情景B）、2231.39万美元（情景C）和2471.67万美元（情景D），即表明到2037年，子长县在四种工程实施情景下的土地利用格局将会为子长县分别带来67.98美元/hm²、82.68美元/hm²、93.18美元/hm²和103.21美元/hm²的碳汇经济价值净收益（图9）。

2.4 退耕还林还草工程对陆地生态系统碳储量的影响

子长县作为全国退耕还林还草工程示范县，自1999年工程实施以来，区域内土地利

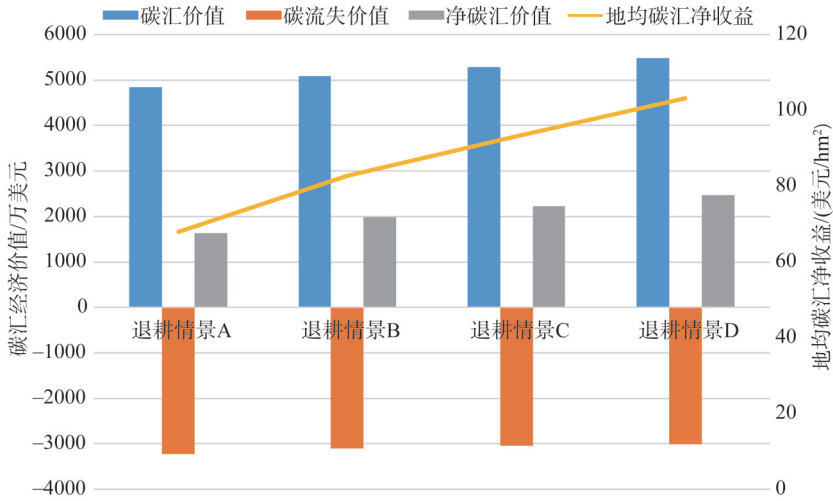


图9 2037年子长县四种不同工程实施情景下的碳汇经济价值

Fig. 9 Economic value of carbon sinks under four project implementation scenarios in Zichang county, 2037

用发生了剧烈变化, 并由此对生态系统碳储存服务造成了巨大的影响。2000—2017年, 子长县共退耕31627.98 hm², 其中19966.95 hm²耕地退耕为了林地, 促使陆地生态系统碳储量增加了765.81×10³ t, 11661.03 hm²耕地退耕为草地, 促使陆地生态系统碳储量增加了13.64×10³ t。工程17年间, 县域内林草覆盖率由2000年的53.26%增长至2017年的64.20%, 陆地生态系统碳储量由2000年的39.19×10⁶ t增长至2017年42.34×10⁶ t, 陆地生态系统地均碳密度由163.65 t/hm²增长至2017年176.79 t/hm²。且从不同的退耕时间段来看, 2000—2008年为工程实施强度最大的阶段, 也是子长县陆地生态系统碳储量增长最为快速的阶段, 这一阶段共退耕16981.29 hm², 促使子长县陆地生态系统碳储量增加了646.53×10⁶ t, 且在第一阶段主要以退耕还林为主, 退耕地中94%退耕为了林地, 使得陆地生态系统碳储量增加了643.41×10³ t, 仅有6%耕地退耕为了草地, 使得陆地生态系统碳储量增加了3.11×10³ t。到工程实施管护阶段(2008—2013年), 退耕强度大幅下降, 这一阶段共退耕10160.01 hm², 且这一阶段主要以退耕还草为主, 共还草8716.86 hm², 贡献碳汇量9.44×10³ t, 由此导致退耕面积虽然仅比前一阶段下降了40%, 然而碳汇量却在这一阶段相比上一阶段下降了84.53%。新一轮工程实施阶段(2013—2017年)共退耕4486.68 hm², 贡献了碳汇量32.92×10³ t, 其中退耕还林2561.4 hm², 贡献了碳汇量31.83×10³ t, 退耕还草1925.28 hm², 贡献了碳汇量1.09×10³ t。

由表4可得, 2017—2037年, 在设定的退耕还林还草情景A下, 预计退耕52719.39 hm², 将会贡献碳汇量2335.12×10³ t, 并产生2624.19万美元的经济价值。其中退耕还林14228.01 hm², 将会带来2247.22×10³ t碳汇, 产生经济价值2525.40万美元, 退耕还草38491.28 hm², 将会带来87.90×10³ t碳汇, 产生经济价值98.78万美元。在退耕还林还草情景B下, 预计退耕53921.88 hm², 将会贡献碳汇量2450.16×10³ t, 并产生2753.47万美元的经济价值。其中退耕还林14924.97 hm², 将会带来2366.31×10³ t碳汇, 产生经济价值2659.24万美元, 退耕还草38996.91 hm², 将会带来83.85×10³ t碳汇, 产生经济价值94.23万美元。在退耕还林还草情景C下, 预计退耕54959.67 hm², 将会贡献碳汇量2730.11×10³ t, 并产生2820.38万美元的经济价值。其中退耕还林15739.56 hm², 将会带

表4 子长县退耕还林还草工程对陆地生态系统碳储量的影响

Table 4 Effect of GFGP on carbon storage in terrestrial ecosystem in Zichang county

	2000— 2008年	2008— 2013年	2013— 2017年	2000— 2017年	退耕 情景A	退耕 情景B	退耕 情景C	退耕 情景D
退耕还林/hm ²	15962.4	1443.15	2561.4	19966.95	14228.01	14924.97	15739.56	16125.12
退耕还草/hm ²	1018.89	8716.86	1925.28	11661.03	38491.38	38996.91	39220.11	40177.26
退耕总面积/hm ²	16981.29	10160.01	4486.68	31627.98	52719.39	53921.88	54959.67	56302.38
退耕还林贡献碳汇量/10 ³ t	643.41	90.57	31.83	765.81	2247.22	2366.31	2429.37	2557.37
退耕还草贡献碳汇量/10 ³ t	3.11	9.44	1.09	13.64	87.90	83.85	80.33	77.43
退耕贡献碳汇总量/10 ³ t	646.53	100.01	32.92	779.45	2335.12	2450.16	2509.70	2634.80
退耕还林贡献碳汇经济 价值/万美元	2525.40	2659.24	2730.11	2873.95	2525.40	2659.24	2730.11	2873.95
退耕还草贡献碳汇经济 价值/万美元	98.78	94.23	90.28	87.02	98.78	94.23	90.28	87.02
退耕贡献碳汇总价值 /万美元	2624.19	2753.47	2820.38	2960.96	2624.19	2753.47	2820.38	2960.96

来 2429.37×10^3 t碳汇，产生经济价值2730.11万美元，退耕还草39220.11 hm²，将会带来 80.3×10^3 t碳汇，产生经济价值90.28万美元。在退耕还林还草情景D下，预计退耕56302.38 hm²，将会贡献碳汇量 2634.80×10^3 t，并产生2820.38万美元的经济价值。其中退耕还林16125.12 hm²，将会带来 2557.37×10^3 t碳汇，产生经济价值2873.95万美元，退耕还草40177.26 hm²，将会带来 77.43×10^3 t碳汇，产生经济价值87.02万美元。

3 结论与讨论

3.1 结论

本文基于退耕还林还草工程实施背景，将FLUS模型和InVEST模型进行耦合，首先运用InVEST模型评估了2000—2017年由工程实施所引起的土地利用变化对子长县陆地生态系统碳储量变化的影响。其次，运用FLUS模拟了子长县2037年在退耕还林还草情景A、退耕还林还草情景B、退耕还林还草情景C和退耕还林还草情景D下的土地利用格局，然后耦合InVEST模型评估了四种退耕情景下的陆地生态系统碳储量变化及其所产生的碳汇经济价值。得到的主要结论如下：

(1) 2000—2017年子长县实施退耕还林还草工程效果显著，17年间共有29744.1 hm²耕地退耕为林地和草地，境内的林草覆盖率由2000年的53.26%增长至2017年的64.20%。工程实施以来，子长县的陆地生态系统碳储量得到了显著提升，由2000年的 39.19×10^6 t增长至2017年的 42.34×10^6 t；陆地生态系统地均固碳能力也得到了显著提升，由163.65 t/hm²增长至2017年的176.79 t/hm²。

(2) 2000—2017年，退耕还林还草工程的实施共使子长县陆地生态系统碳储量增加了 779.45×10^3 t，且主要集中在工程实施主要阶段（2000—2008年），陆地生态系统碳储量在这一阶段共增加了 646.53×10^3 t，占增加总量的82.95%。从退耕还林和退耕还草的碳汇贡献量来看，退耕还林是促使子长县生态系统碳储存服务得到提升的主要因素。2000—2017年，子长县由退耕还林共使得陆地生态系统碳储量增加了 765.81×10^3 t，占增加总量的98.25%，而退耕还草贡献量仅占1.75%。2017—2037年，子长县生态系统碳储存服务在四

种不同的工程实施情景下将会继续得到提升,其中耕地继续退耕为林地所产生的碳汇量仍将是促使生态系统碳储存服务提升最主要因素。

(3) 2017—2037年,子长县土地利用格局在四种不同的工程实施情景下会继续发生剧烈变化,但仍集中在耕地、林地和草地三种地类之间。耕地继续退耕为林地和草地将使得子长县陆地生态系统碳储量继续呈增长态势,预计到2037年子长县陆地生态系统碳储量在退耕还林还草情景A、退耕还林还草情景B、退耕还林还草情景C和退耕还林还草情景D下将会分别达到: 43.78×10^6 t、 44.10×10^6 t、 44.32×10^6 t和 44.54×10^6 t。陆地生态系统地均固碳能力也将得到进一步增强,在四种情景下将会依次分别达到: 182.84 t/hm²、 184.14 t/hm²、 185.08 t/hm²、 185.97 t/hm²,并将由此获得碳汇经济价值净收益分别为1627.88万美元、1979.89万美元、2231.39万美元和2471.67万美元,地均碳汇经济价值净收益也将分别达到67.98美元/hm²、82.68美元/hm²、93.18美元/hm²和103.21美元/hm²。

(4) 本文将FLUS模型和InVEST模型进行耦合,首先能为未来退耕还林还草工程在空间上的布局实施提供一定的参考价值,进而提升退耕还林还草的实施效率与效果。其次,还为日后学者评估其他生态工程的实施对生态系统碳储存服务的影响提供了可供参考的研究框架。

3.2 讨论

本文将FLUS模型和InVEST模型进行耦合,用于评估退耕还林还草工程对陆地生态系统碳储量的影响,并取得了良好的效果。然而仍存在以下三点可供讨论之处:

(1) 虽然在对陆地生态系统碳储量的评估中,InVEST模型以其简单、快速、适用范围广等优点而在全世界范围内得到了广泛的运用,并推动了对生态系统碳储存服务研究的进展。然而,InVEST模型也存在一定的局限性。首先,InVEST模型的碳循环原理过于简化,研究区土地利用类型的碳库密度被认为是固定不变的,这就意味着研究区的陆地生态系统碳储量仅会随着研究时段内土地利用类型面积变化而变化^[49];并且计算所需参数均来自于参考前人相关研究,虽然本文使用气温和降水对研究区域碳库密度进行了区域修正,然而仍使得模型结果存在一定的不确定性。在今后的研究中,应通过实地调研获取实测数据对碳密度值的合理性进行验证,对研究区域选取的样地进行连续多年监测,使得土地利用类型内部空间异质性以及植被年龄结构对碳密度的影响能够得到及时更新补充^[43],进而使得InVEST模型的评估结果更为准确。

(2) 在未来土地利用变化情景设置上,本文的情景设定主要侧重于土地利用数量的约束,且运用Markov对未来不同情景下的用地类型数量预测上主要依据土地利用变化的历史趋势,致使本文在情景的设置和对未来不同情景下用地类型的数量预测中忽略了地方政府在社会经济政策和土地利用规划政策上对未来土地利用变化的约束和干预^[50],因此在未来的研究中如何结合地方发展政策,综合考虑研究区自然和社会系统的发展过程,设置更为贴近现实和符合政策导向下的土地利用发展情景将是未来研究的重点。

(3) 本文在使用FLUS模型对未来不同的土地利用发展情景进行模拟的驱动因子的选取上,虽然从自然和社会两方面选取了共10个驱动因子,然而人口和经济作为影响土地利用变化最为重要的两个因素,本文因数据获取的局限性暂未考虑,可能会减弱人类活动在模型对模拟用地类型空间分配的影响,导致模拟精度下降。因此,今后在土地利用变化模拟的驱动因素选择上,应尽可能地考虑加上人口和经济两大因素,以提高模型模拟的精度。

参考文献(References):

- [1] COSTANZA R, D'ARGE R, DE GROOT R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387(6630): 253-260.
- [2] Millennium Ecosystem Assessment. *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Island Press, Washington, D C, 2005.
- [3] 蔚芳, 詹小稳. 基于生境质量与碳储量的城市刚性开发边界划定. *浙江大学学报: 工学版*, 2019, 53(8): 1478-1487. [WEI F, ZHAN X W. Delineation of rigid urban growth boundary based on habitat quality and carbon storage. *Journal of Zhejiang University: Engineering Science*, 2019, 53(8): 1478-1487.]
- [4] HOUGHTON R A. Revised estimates of the annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use and land management 1850-2000. *Tellus B*, 2003, 55(2): 378-390.
- [5] HOUGHTON R A. The annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use 1850-1990. *Tellus B*, 1999, 51(2): 298-313.
- [6] HOUGHTON R A, HACKLER J L. Emissions of carbon from forestry and land-use change in tropical Asia. *Global Change Biology*, 1999, 5(4): 481-492.
- [7] 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. [GE Q S, DAI J H, HE F N, et al. Study on land use, land cover changes and carbon cycle in China in the past 300 years. *Scientia Sinica: Terrae*, 2008, 38(2): 197-210.]
- [8] 曲福田, 卢娜, 冯淑怡. 土地利用变化对碳排放的影响. *中国人口·资源与环境*, 2011, 21(10): 76-83. [QU F T, LU N, FENG S Y. Effects of land use change on carbon emissions. *China Population, Resources and Environment*, 2011, 21(10): 76-83.]
- [9] 周德成, 赵淑清, 朱超. 退耕还林还草工程对中国北方农牧交错区土地利用/覆被变化的影响: 以科尔沁左翼后旗为例. *地理科学*, 2012, 32(4): 442-449. [ZHOU D C, ZHAO S Q, ZHU C. The impact of the grain for green project on the land use/cover change in the northern farming-pastoral ecotone, China: A case study of Kezuohouqi county. *Scientia Geographica Sinica*, 2012, 32(4): 442-449.]
- [10] DENG L, LIU G, SHANGGUANZ P. Land-use conversion and changing soil carbon stocks in China's 'Grain-for-Green' Program: A synthesis. *Global Change Biology*, 2014, 20(11): 3544-3556.
- [11] WANG Y, LIU L, SHANGGUAN Z P. Carbon storage and carbon sequestration potential under the Grain for Green Program in Henan province, China. *Ecological Engineering*, 2017, 100: 147-156.
- [12] 姚平, 陈先刚, 周永锋, 等. 西南地区退耕还林工程主要林分50年碳汇潜力. *生态学报*, 2014, 34(11): 3025-3037. [YAO P, CHEN X G, ZHOU Y F, et al. Carbon sequestration potential of the major stands under the Grain for Green Program in Southwest China in the next 50 years. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(11): 3025-3037.]
- [13] 刘淑娟, 张伟, 王克林, 等. 桂西北典型喀斯特峰丛洼地退耕还林还草的固碳效益评价. *生态学报*, 2016, 36(17): 5528-5536. [LIU S J, ZHANG W, WANG K L, et al. Evaluation of carbon sequestration after conversion of cropland to forest and grassland projection in karst peak-cluster depression area of Northwest Guangxi, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(17): 5528-5536.]
- [14] 赵瑞, 孙保平, 于明含, 等. 广西壮族自治区平果县退耕还林植被碳储量特征. *水土保持通报*, 2015, 35(3): 350-353. [ZHAO R, SUN B P, YU M H, et al. Characters of carbon storage in forests of grain for green project in Pingguo county, Guangxi Zhuang Autonomous Region. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2015, 35(3): 350-353.]
- [15] LIU D, CHEN Y, CAI W, et al. The contribution of China's Grain to Green Program to carbon sequestration. *Landscape Ecology*, 2014, 29(10): 1675-1688.
- [16] ZHOU D, ZHAO S, LIU S, et al. Modeling the effects of the sloping land conversion program on terrestrial ecosystem carbon dynamics in the Loess Plateau: A case study with Ansai county, Shaanxi province, China. *Ecological Modelling*, 2014, 288: 47-54.
- [17] 徐自为, 张智杰. 基于土地利用变更调查的2010—2016年新疆尉犁县生态系统碳储量时空变化. *环境科学研究*, 2018, 31(11): 1909-1917. [XU Z W, ZHANG Z J. Spatiotemporal variation of carbon storage in Yuli county during 2010-2016. *Research of Environmental Sciences*, 2018, 31(11): 1909-1917.]
- [18] 范立红, 朱建华, 李奇, 等. 三峡库区土地利用/覆被变化对碳储量的影响. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2018, 42(4): 53-60. [FAN L H, ZHU J H, LI Q, et al. Effects of changes in land use and cover on carbon storage in the Three

- Gorges Reservoir Area. *Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition*, 2018, 42(4): 53-60.]
- [19] 郜红娟, 韩会庆, 张朝琼, 等. 乌江流域贵州段2000—2010年土地利用变化对碳储量的影响. *四川农业大学学报*, 2016, 34(1): 48-53. [GAO H J, HAN H Q, ZHANG C Q, et al. Effects of land use change on carbon storage in Wujiang River of Guizhou province from 2000-2010. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2016, 34(1): 48-53.]
- [20] 张影, 谢余初, 齐姗姗, 等. 基于InVEST模型的甘肃白龙江流域生态系统碳储量及空间格局特征. *资源科学*, 2016, 38(8): 1585-1593. [ZHANG Y, XIE Y C, QI S S, et al. Carbon storage and spatial distribution characteristics in the Bailongjiang Watershed in Gansu based on In VEST model. *Resources Science*, 2016, 38(8): 1585-1593.]
- [21] HE C, ZHANG D, HUANG Q, et al. Assessing the potential impacts of urban expansion on regional carbon storage by linking the LUSD-urban and InVEST models. *Environmental Modelling & Software*, 2016, 75: 44-58.
- [22] JIANG W, DENG Y, TANG Z, et al. Modelling the potential impacts of urban ecosystem changes on carbon storage under different scenarios by linking the CLUE-S and the InVEST models. *Ecological Modelling*, 2017, 345: 30-40.
- [23] LYU R, MI L, ZHANG J, et al. Modeling the effects of urban expansion on regional carbon storage by coupling SLEUTH-3r model and InVEST model. *Ecological Research*, 2019, 34(3): 380-393.
- [24] WANG J, ZHANG Q, GOU T, et al. Spatial-temporal changes of urban areas and terrestrial carbon storage in the Three Gorges Reservoir in China. *Ecological Indicators*. 2018, 95: 343-352.
- [25] 朱冠华. 基于高分辨率遥感数据的绿洲区盐化土壤分布变化研究. 北京: 北京交通大学, 2018. [ZHU G H. Monitoring and prediction of salinity soil in oasis based on high-resolution remote sensing data. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.]
- [26] 梁讯. 耦合人类活动与自然效应的土地利用变化模拟(FLUS)的构建与应用. 广州: 中山大学, 2018. [LIANG X. Construction and application of land use change simulation (FLUS) coupled with human activities and natural effects. Guangzhou: Sun Yat-sen University, 2018.]
- [27] LI X, CHEN G, LIU X, et al. A new global land-use and land-cover change product at a 1-km resolution for 2010 to 2100 based on human-environment interactions. *Annals of the American Association of Geographers*, 2017, 107(5): 1040-1059.
- [28] 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.
- [29] LI X, YEH A G. Neural-network-based cellular automaton for simulating multiple land use changes using GIS. *International Journal of Geographical Information Science*, 2002, 16(4): 323-343.
- [30] 彭怡, 王玉宽, 傅斌, 等. 汶川地震重灾区生态系统碳储存功能空间格局与地震破坏评估. *生态学报*, 2013, 33(3): 798-808. [PENG Y, WANG Y K, FU B, et al. Spatial distribution of carbon storage function and seismic damage in wenchuan earthquake-stricken areas. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(3): 798-808.]
- [31] 刘纪远, 宁佳, 匡文慧, 等. 2010—2015年中国土地利用变化的时空格局与新特征. *地理学报*, 2018, 73(5): 789-802. [LIU J Y, NING J, KUANG W H, et al. Spatio-temporal patterns and characteristics of land-use change in China during 2010-2015. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(5): 789-802.]
- [32] 张景华, 封志明, 姜鲁光. 土地利用/土地覆被分类系统研究进展. *资源科学*, 2011, 33(6): 1195-1203. [ZHANG J H, FENG Z M, JIANG L G. Progress on studies of land use/land cover classification systems. *Resources Science*, 2011, 33(6): 1195-1203.]
- [33] 曹帅, 金晓斌, 杨绪红, 等. 耦合MOP与GeoSOS-FLUS模型的县级土地利用结构与布局复合优化. *自然资源学报*, 2019, 34(6): 1171-1185. [CAO S, JIN X B, YANG H X, et al. Coupled MOP and GeoSOS-FLUS models research on optimization of land use structure and layout in Jintan district. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(6): 1171-1185.]
- [34] 王万茂. 土地利用规划学. 北京: 科学出版社, 2006. [WANG W F. Planning of Land Use. Beijing: Science Press, 2006.]
- [35] 权瑞松. 基于情景模拟的上海土地利用变化预测及其水文效应. *自然资源学报*, 2018, 33(9): 1552-1562. [QUAN R S. Prediction of land use change and its hydrological effect in Shanghai based on scenario simulation. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(9): 1552-1562.]
- [36] 布仁仓, 常禹, 胡远满, 等. 基于Kappa系数的景观变化测度: 以辽宁省中部城市群为例. *生态学报*, 2005, (4): 778-784. [BU R C, CHANG Y, HU Y M, et al. Measuring spatial information changes using Kappa coefficients: A case

- study of the city groups in central Liaoning province. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, (4): 778-784.]
- [37] SHARP R, TALLIS H T, RICKETTS T, et al. InVEST user's guide. The Natural Capital Project: Stanford, CA, USA, 2014.
- [38] 许泉, 芮雯奕, 何航, 等. 不同利用方式下中国农田土壤有机碳密度特征及区域差异. *中国农业科学*, 2006, (12): 2505-2510. [XU Q, RUI W Y, HE H, et al. Characteristics and regional differences of soil organic carbon density in farmland under different land use patterns in China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, (12): 2505-2510.]
- [39] 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. *土壤学报*, 2004, (1): 35-43. [XIE X L, SUN B, ZHOU H Z, et al. Organic carbon density and storage in soils of China and spatial analysis. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, (1): 35-43.]
- [40] 李克让, 王绍强, 曹明奎. 中国植被和土壤碳贮量. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 2003, (1): 72-80. [LI K R, WANG S Q, CAO M K. Carbon storage of vegetation and soil in China. *Science in China, Ser. D*, 2003, (1): 72-80.]
- [41] 马钦彦, 陈遐林, 王娟. 中国北方主要森林类型含碳量的测定. *北京林业大学学报*, 2002, 56(24): 96-100. [MA Q Y, CHEN X L, WANG J. Determination of carbon content of major forest types in Northern China. *Journal of Beijing Forestry University*, 2002, 56(24): 96-100.]
- [42] 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. [CHUAI X W, HUANG X J, ZHENG ZE Q, et al. Land use change and its influence on carbon storage of terrestrial ecosystems in Jiangsu province. *Resources Science*, 2011, 33(10): 1932-1939.]
- [43] 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. [ZHU W B, ZHANG J J, CUI Y P, et al. Assessment of territorial ecosystem carbon storage based on land use change scenario: A case study in Qihe River Basin. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(3): 446-459.]
- [44] 陈光水, 杨玉盛, 谢锦升, 等. 中国森林的地下碳分配. *生态学报*, 2007, (12): 5148-5157. [CHEN G S, YANG Y S, XIE J S, et al. Total belowground carbon allocation in China's forests. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, (12): 5148-5157.]
- [45] GIARDINA C P, RYAN M G. Evidence that decomposition rates of organic carbon in mineral soil do not vary with temperature. *Nature*, 2000, 404(6780): 858.
- [46] ALAM S A, STARR M, CLARK B J. Tree biomass and soil organic carbon densities across the Sudanese woodland savannah: A regional carbon sequestration study. *Journal of arid environments*, 2013, 89: 67-76.
- [47] RICKE K, DROUET L, CALDEIRA K, et al. Country-level social cost of carbon. *Nature Climate Change*, 2018, 8(10): 895.
- [48] 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(8): 474.
- [49] LIU X, WANG S, WU P, et al. Impacts of urban expansion on terrestrial carbon storage in China. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53(12): 6834-6844.
- [50] 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. [ZHOU R, SU H L, WANG X J, et al. Simulation of land use change in Xin Zhuang Town under different scenarios based on the CLUE-S Model and Markov Model. *Resources Science*, 2011, 33(12): 2262-2270.]

Assessing the effects of the Green for Grain Program on ecosystem carbon storage service by linking the InVEST and FLUS models: A case study of Zichang county in hilly and gully region of Loess Plateau

DENG Yuan-jie^{1,2}, YAO Shun-bo^{1,2}, HOU Meng-yang^{1,2}, ZHANG Tong-yue¹,
LU Ya-nan^{1,2}, GONG Zhi-wen^{1,2}, WANG Yi-fei^{1,2}

(1. College of Economics and Management, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China;

2. Centre for Resource Economic and Environmental Management, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China)

Abstract: Terrestrial carbon storage is an important indicator of ecosystem carbon storage services, and it has a close relationship with land use change. The Green for Grain Program (GFGP) has brought about great changes in the pattern of land use in the region and had a major impact on ecosystem carbon storage services. In order to simply and quickly assess the impact of GFGP on terrestrial ecosystem carbon storage services, this paper takes Zichang county, which is located in the hilly and gully region of the Loess Plateau, as an example, and used InVEST model to assess the impact of GFGP on the carbon storage of terrestrial ecosystems. Moreover, by coupling InVEST model and FLUS model, according to the set A, B, C, and D scenarios of GFGP, the change of terrestrial ecosystem carbon storage and the economic value of carbon sinks in Zichang county in 2037 were predicted. The study found that: (1) Remarkable effect of GFGP in Zichang county occurred. From 2000 to 2017, a total of 31627.98 hm² of cultivated land was converted to woodland and grassland. The forest and grass coverage rates in the study area increased from 53.26% in 2000 to 64.20% in 2017. (2) The carbon storage service of the terrestrial ecosystem was significantly improved from 2000 to 2017. The terrestrial carbon storage increased from 39.19×10⁶ t in 2000 to 42.34×10⁶ t in 2017, and its growth was mainly found in the main stage of project implementation from 2000 to 2008. (3) In the future, it is assumed that the GFGP will continue to be implemented in the county, and its ecosystem carbon storage services will be further improved. In addition, certain carbon sink economic value will be obtained. Until 2037, it is expected that the terrestrial carbon reserves under the four scenarios of GFGP in the county will reach 43.78×10⁶ t (GFGP scenario A), 44.10×10⁶ t (GFGP scenario B), 44.32×10⁶ t (GFGP scenario C) and 44.54×10⁶ t (GFGP scenario D), respectively. Thus, the net income from the economic value of carbon sinks was US \$ 1627.88 million, US \$ 1979.89 million, US \$ 2231.39 million and US \$ 2471.67 million, respectively. The coupled InVEST-FLUS model can not only use the InVEST model to evaluate land carbon stocks simply and quickly, but also calculate the terrestrial carbon reserves and carbon sink economic value under future land use change scenarios based on the FLUS model.

Keywords: Green for Grain Program (GFGP); terrestrial ecosystem carbon storage; InVEST model; FLUS model; Zichang county