

doi: 10.6046/zrzyyg.2021348

引用格式: 杨激威,赵娟,朱家田,等. 基于 PLUS 和 InVEST 模型的西安市生态系统碳储量时空变化与预测[J]. 自然资源遥感,2022,34(4):175-182. (Yang L W, Zhao J, Zhu J T, et al. Spatial-temporal change and prediction of carbon stock in the ecosystem of Xi'an based on PLUS and InVEST models[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2022, 34(4): 175-182.)

基于 PLUS 和 InVEST 模型的西安市生态系统碳储量时空变化与预测

杨激威¹, 赵娟¹, 朱家田¹, 刘雷¹, 张平^{1,2}

(1. 西安工程大学环境与化学工程学院, 西安 710600; 2. 陕西省土地整治重点实验室, 西安 710075)

摘要: 土地利用通过影响陆地生态系统结构布局和功能引起碳储量变化, 研究土地利用变化与碳储量的关系对优化区域土地利用格局、合理生态决策具有重要意义。文章运用 PLUS 模型结合 InVEST 模型预测了西安市未来不同情景下土地利用及碳储量时空变化特征, 研究了土地利用变化对碳储量的影响。结果表明: 建设用地扩张, 高碳密度用地转移使得 2000—2015 年西安市碳储量减少了 2.49×10^6 t, 在自然增长情景下碳储量持续下降, 2015—2030 年将减少 2.14×10^6 t; 由于生态保护情景采取措施保护用地、控制转移, 碳储量增加了 6.92×10^5 t; 耕地保护情景下, 耕地得到保护, 但林地和草地等高碳密度用地受到建设用地扩张影响使得碳储量下降为 1.60×10^8 t。碳密度变化分析得出, 采取生态保护措施, 使得碳密度变化率有所提高, 相比于自然增长情景, 生态保护情景将碳密度的增长区占比由 0.05% 提高到 1.57%, 以高增长区为主。而耕地保护情景碳密度有所下降, 增长区由高增长转变为较高增长。在保护耕地的基础上, 西安市未来土地利用规划应当采取生态保护措施, 控制建设用地向耕地和林地的高速扩张, 优化土地利用格局, 有效降低碳储量损失, 提高区域碳储量水平, 实现区域可持续发展。

关键词: 土地利用变化; PLUS 模型; InVEST 模型; 西安市; 碳储量

中图法分类号: TP 79; X 144 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-034X(2022)04-0175-08

0 引言

陆地生态系统作为地表重要的生态系统类型之一, 其碳储量的变化会通过调节、转化、循环机制影响全球碳排放、温室气体浓度等多个方面, 在全球气候调节和减缓温室效应进程中都起到了重要的作用^[1]。陆地生态系统中的植被、土壤和其他生物质作为重要碳库通过其“固持”作用将二氧化碳等固定在碳库中, 减少碳在大气中的含量, 起到调节局部区域气候和减缓全球气候变暖进程的作用^[2]。开展碳储量相关研究, 可以有效监测区域碳的变化, 保障碳库发挥调节作用, 对进行区域生态保护和制定生态与经济平衡发展的规划政策具有重要意义。

目前对碳储量进行评估的方法较多, 传统的评估方法有生物量法和蓄积量法等, 但由于传统方法

在反映碳储量尺度上与时空序列的变化时存在劣势, 故越来越多的学者采用模型的方式评估碳储量的变化^[3-4]。在所有模型中, InVEST 模型具有数据需求少、运行速度快等特点, 以土地利用空间变化为依据基于 InVEST 模型各模块可将碳储量和生境质量等生态系统服务变化可视化^[5-6], 因此使用 InVEST 模型可以定量评估研究区碳储量变化, 分析土地利用变化对碳储量的影响。

近年来对碳储量进行研究, 特别是对土地利用与碳储量变化关系的探索引起了众多学者的关注^[7-8]。土地利用作为影响碳储量变化的主要驱动因素, 其变化会改变生态系统的组成与功能, 对植被和土壤的固碳能力产生一定作用, 从而影响到区域碳储量水平, 对土地利用变化进行研究能够很好地分析土地利用对碳储量变化造成的影响^[9]。众多专家学者运用多种模型模拟土地利用变化与碳储量

收稿日期: 2021-10-21; 修订日期: 2022-05-21

基金项目: 陕西省自然科学基金面上项目“高分辨率高精度 PM₁₀ 污染对城市三维景观格局的响应机制”(编号: 2021JM-447)和陕西省土地整治重点实验室基金项目“生态系统服务功能对土地整治和气候变化的响应机制研究”(编号: 2018-JC12)共同资助。

第一作者: 杨激威(1996-), 男, 硕士研究生, 主要从事土地利用模拟与生态系统服务相关研究。Email: ylw8810015@163.com。

通信作者: 张平(1981-), 男, 副教授, 主要从事生态系统服务定量评估、景观格局与大气污染模拟等方面的研究。Email: pingzhang_2008@126.com。

的关系,吴佩君等^[10]基于 InVEST 模型和元胞自动机 (cellular automata, CA) 模型分析广东省 1980—2010 年碳储量变化,并模拟了 2040 年城市扩张对碳储量的影响;Liang 等^[11]基于 SD-CLUE-S 模型和 InVEST 模型模拟了 2018 年不同情景不同尺度下张掖绿洲土地利用变化和碳储量变化,发现严格保护情景下绿洲拥有最大碳储量,并建议保护耕地和控制建设用地扩张;PLUS 模型作为一种新开发的模型,综合了挖掘土地利用变化驱动机理的转化分析策略(例如 logistic-CA 模型)和基于浮现概率与竞争机制的格局分析策略(例如 CLUE-S 模型)的优势部分,并结合种子生长机制和多目标算法,能够更加精确地分析土地利用变化,反映更为真实的景观状态。该模型目前已被运用在研究武汉市土地利用变化与驱动力的关系,以及预测 2035 年不同情景下土地利用变化中,但将该模型应用于生态系统碳储量定量评估的研究还较少^[12]。

本文以中国西部地区重要中心城市西安市为研究区,采用 2000 年和 2015 年西安市土地利用数据和驱动因素,基于 PLUS 模型预测 2030 年不同情景下土地利用空间分布,并利用 InVEST 模型估算未来不同情景下碳储量的变化,探索碳储量的变化及其未来发展的趋势。研究可为优化西安市的土地利用格局、进行合理的生态决策和实现可持续发展提供参考。

1 研究区概况与数据源

1.1 研究区概况

西安市(E107°40′~109°49′,N33°42′~34°45′)位于陕西省中部,属于关中平原城市群核心城市(图 1)。西安市地处关中平原中部,地势南高北低,南部为秦岭山脉,北部为渭河冲积平原,东部为骊山丘陵区。气候属东亚暖温带半湿润大陆性季风气候。市内太白山国家级自然保护区有 21 种重点保护植物和 20 种重点保护动物,具有重要的生态价值。西安市经济发展重点集中在区域北部和东部,2015 年全市生产总值为 5 801.20 亿元,约占全省的 32.19%,总人口约 870.56 万人,人均国内生产总值(gross domestic product, GDP)为 66 938 元。西安市的发展对西北的发展起带动作用,以西安市为研究区,探索西安市未来发展趋势,探讨情景政策对西安市未来土地利用变化和碳储量影响,有助于研究在经济发展趋势下如何协调好与生态、自然发展的关系,对西北各大城市土地利用合理规划提供重要的指导意义。

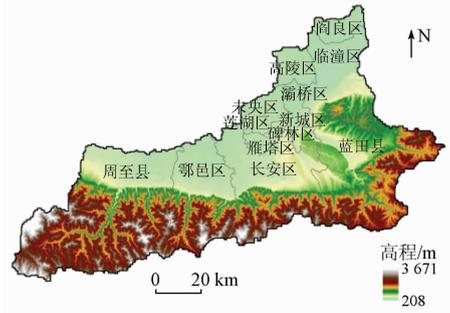


图 1 研究区地理位置概况

Fig. 1 Location of the study area

1.2 数据源

本研究中 2000 年和 2015 年 2 期西安市土地利用现状数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>),空间分辨率为 30 m,参考土地资源分类将土地利用分为耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地 6 类;气温和降水等气象数据来源于中国气象数据网(<http://www.nmic.cn>)实测站点数据,并通过反距离权重插值得到,空间分辨率为 100 m;行政边界数据、社会经济数据和归一化差异植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)数据集来源于中国科学院资源与环境数据中心,数字高程模型(digital elevation model, DEM)数据来自地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn/>),空间分辨率为 30 m;道路数据来自 OpenStreetMap(<https://www.openstreetmap.org/>),夜间灯光数据由中国科学院中国遥感卫星地面站陈甫团队提供的地球夜光“火石”数据集,空间分辨率为 1 500 m;土壤数据来源于联合国粮农组织和维也纳国际应用系统研究所构建的世界土壤数据库(harmonized world soil database, HWSD),空间分辨率为 1 000 m。

2 研究方法

2.1 PLUS 模型

PLUS 模型是由中国地质大学 Liang 等^[12]开发的一个具有更高模拟精度和更能真实度量景观格局的土地利用模拟模型。PLUS 模型主要由基于土地扩张分析策略(land expansion analysis strategy, LEAS)的转换规则挖掘模块和基于多类随机斑块种子机制的 CA(CA based on multi-type random patch seeds, CARS)模块组成。LEAS 模块提取初期土地利用向末期扩张的部分,并采用随机森林分类(random forest classification, RFC)算法挖掘土地利用类型的变化概率和惯性概率,探索驱动力与土地利用之间的关系,计算公式为:

$$P_{i,k}^d(\mathbf{x}) = \frac{\sum_{n=1}^M I[h_n(\mathbf{x}) = d]}{M}, \quad (1)$$

式中: \mathbf{x} 为多种驱动力组成的向量; $h_n(\mathbf{x})$ 为向量 \mathbf{x} 的第 n 个决策树的预测类型; d 的值为 0 或 1, 其中 1 为在栅格 i 上存在其他土地利用类型转化为该 k 类土地利用类型, 0 则为其他转化; M 为决策树的总数; I 为决策树集合的指示函数。

CARS 模块主要为基于多类随机斑块种子的 CA 模型, 用于模拟复杂的自然地理现象的空间变化。CARS 通过一个自适应系数影响局部土地利用竞争和驱动土地利用数量变化来达到未来土地利用需求。该模块主要包含 2 部分:

1) 宏观需求与局部竞争的反馈机制。该反馈机制主要达成多类随机斑块种子的生成, 进而模拟计算土地利用类型 k 的总体概率 $OP_{i,k}^{d=1,t}$, 公式为:

$$OP_{i,k}^{d=1,t} = P_{i,k}^{d=1} \Omega_{i,k}^t D_k^t, \quad (2)$$

式中: $P_{i,k}^{d=1}$ 为栅格 i 土地利用类型 k 的增长概率; D_k^t 为土地利用类型 k 未来需求的影响, 是一个自适应驱动系数, 它取决于迭代出的土地利用类型 k 在 t 时期土地利用数量与需求之间的差距; $\Omega_{i,k}^t$ 为栅格 i 的邻域效应, 即 k 类土地利用在下一个邻域内的覆盖比例。CARS 根据所有土地利用类型的总体概率构造轮盘赌, 用于在下次迭代中选择土地利用状态^[13]。

2) 多类随机斑块种子阈值递减。PLUS 模型通过多类随机斑块种子阈值递减趋势, 计算利用类型整体概率过程来演化多种土地利用类型的斑块。当土地利用 k 的邻域效应等于 0 时, 总体概率为:

$$OP_{i,k}^{d=1,t} = \begin{cases} P_{i,k}^{d=1} (r \mu_k) D_k^t, & \Omega_{i,k} = 0 \text{ 且 } r < P_{i,k}^{d=1} \\ P_{i,k}^{d=1} \Omega_{i,k}^t D_k^t, & \text{其他} \end{cases}, \quad (3)$$

式中: r 为范围 0~1 的随机值; μ_k 为新生成土地利用类型 k 斑块的阈值。PLUS 模型中生成的种子能生长成新的土地利用类型栅格, 并逐渐组成新斑块群。在用地类型竞争的过程中 PLUS 模型通过阈值递减规则, 利用阈值 τ 来评估轮盘赌所确定的地类, 以限制地类的自发增长, 促使结果更优。PLUS 模型基于 LEAS 和 CARS 模块, 能确定最优的土地利用布局, 可以更好地模拟多种土地利用斑块变化, 从而更好地支持规划政策以实现可持续发展。

2.2 土地利用情景设置

1) 自然增长情景。依据 2000—2015 年土地利

用转移矩阵结合 Markov 模型, 以 15 a 为步长预测 2030 年自然增长情景下西安市各土地利用类型的面积。

2) 生态保护情景。该情景主要考虑生态环境的发展, 依据西安市土地利用总体规划中生态用地植被的增长率, 以自然发展情景为基础, 使耕地向建设用地转移概率减少 50%, 森林和草地向建设用地转移概率减少 30%^[14], 适当减缓建设用地的扩张。此外, 该情景还将长白山自然保护区作为限制区。

3) 耕地保护情景。该情景主要保障粮食安全的来源耕地, 是在保证西安市土地利用总体规划中耕地面积保有量的前提下, 严格执行耕地占补政策达成耕地面积补充量目标, 保障耕地面积^[15]。同时按总体规划控制建设用地基本总量, 并保障耕地所需水源的水域基本增长。

2.3 InVEST 模型碳储量模块

InVEST 模型是由自然资本项目开发用于评估多种生态系统服务功能的模型^[16-17]。InVEST 模型的碳储量模块将陆地生态系统中的碳储量划分为 4 个碳库^[18-19]: 地上生物碳(植被、树叶和树枝等活的植被中的碳)、地下生物碳(植物活根系统中的碳)、土壤碳(有机土壤和矿质土壤中的碳)、死亡有机碳(凋零物、倒木和枯木中的碳), 通过将 4 个碳库的平均碳密度与相应土地利用类型面积相乘并求和得到总碳储量, 计算公式为:

$$C_{\text{total}} = C_{\text{above}} + C_{\text{below}} + C_{\text{soil}} + C_{\text{dead}}, \quad (4)$$

式中: C_{total} 为研究区总碳储量, t; C_{above} 为地上生物碳, t; C_{below} 为地下生物碳, t; C_{soil} 为土壤碳, t; C_{dead} 为死亡有机碳, t。

3 结果与分析

3.1 2000—2015 年西安市土地利用空间变化分析

利用 GIS 软件平台得到 2000 年和 2015 年西安市土地利用空间分布(图 2), 研究发现西安市土地利用类型以耕地和林地为主, 研究区北部用地类型主要为耕地, 其次为建设用地, 属于西安市 GDP 主要贡献区域, 是重点发展区域, 与之相应的北部也表现出较大的生态压力。南部主要用地类型为林地和草地, 其中林地占有较大的比重, 南部的秦岭山地为规划中重要的城市生态安全屏障。东部为骊山丘陵区, 用地类型以林地为主, 耕地和草地均占有一定的比例。土地利用转移矩阵如表 1 所示。

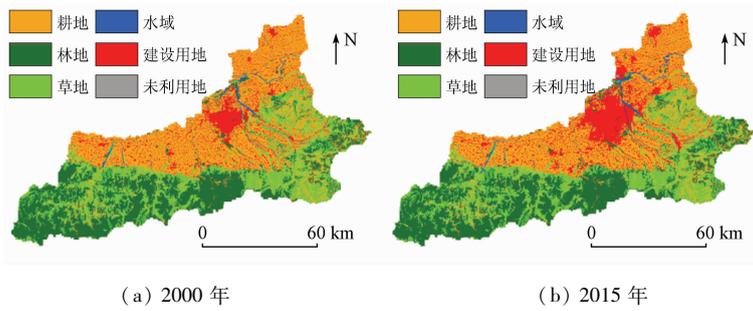


图 2 2000 年和 2015 年土地利用变化空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of land use change in 2000 and 2015

表 1 西安市 2000—2015 年土地利用转移矩阵

Tab. 1 Land use transfer matrix in Xi'an City from 2000 to 2015

(hm^2)

土地利用类型	2015 年						
	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	总和
2000 年 耕地	312 081	5 334	11 333	2 747	47 615	49	379 159
林地	3 596	267 261	6 846	460	2 568	42	280 773
草地	12 732	8 407	179 967	592	1 729	29	203 456
水域	1 531	398	379	7 839	620	0	10 767
建设用地	7 572	401	366	127	72 813	1	81 280
未利用地	49	0	1	0	9	188	247
总和	337 561	281 801	198 892	11 765	125 354	309	955 682

依据图 2 和表 1 得出,2000 年耕地和林地面积占比较大,分别为 39.67% 和 29.38%,草地、建设用地和水域占比分别为 21.29% ,8.50% 和 1.13% ,未利用地仅占 0.03%。相比于 2000 年,2015 年西安市耕地面积大幅减少,主要向建设用地和草地转化。林地和草地面积变化率不大,水域和未利用地面积小幅增加。建设用地则表现出明显的扩张趋势,2000—2015 年面积增幅为 54.22%。耕地面积大幅减少的原因是耕地主要受到建设用地侵占,林地和草地虽向耕地转移,但以转出为主。建设用地的强烈扩张趋势表明,2000—2015 年西安市呈现出明显的经济发展态势,第二和第三产业不断发展,城区大幅度向周边扩张,然而经济增长、城市高速扩张所带来的经济增长和基础设施的建设也会造成一定的生态压力。

3.2 模型精度验证

本研究基于 2000 年土地利用数据结合驱动力数据,应用 PLUS 模型模拟 2015 年土地利用空间分布,采用 Kappa 系数对模拟的 2015 年西安市土地利用与实际的 2015 年西安市土地利用进行精度检验,验证结果显示 Kappa 系数为 0.857,满足研究要求。

3.3 不同情景下土地利用空间变化分析

根据 PLUS 模型模拟预测的 2030 年自然增长情景下的土地利用分布(图 3),可以得出,自然增长情景延续了 2000—2015 年土地利用变化趋势,2015—2030 年耕地面积减少了 30 251 hm^2 。草地也呈现出减小趋势,面积减少 4 891 hm^2 ,林地和水域面积小幅增加。其中草地主要向建设用地转移,这表明建设用地在向耕地扩张的同时,也将逐渐开始向草地扩张,建设用地面积增幅为 27.35%。

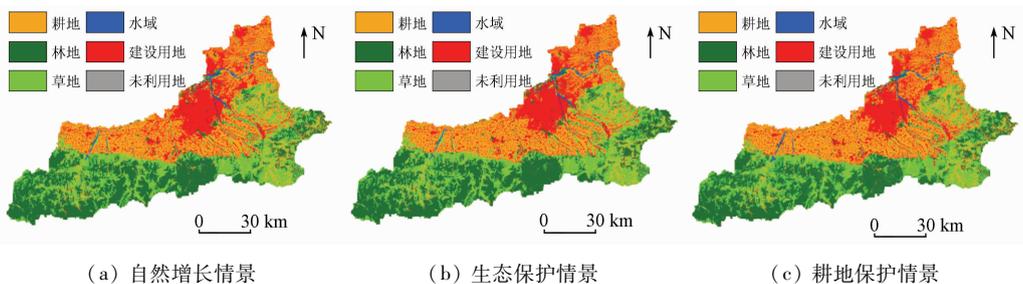


图 3 模拟 2030 年不同情景下的土地利用变化空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of land use change under different scenarios in 2030

生态保护情景下由于采取了水源保护、退耕还林和退耕还草等措施,在避免了林地和草地转移的

同时,耕地适当向林地和草地转入。2015—2030 年间耕地面积减少了 38 313 hm^2 。林地和草地呈现出

较大增幅,面积分别增加了 8 440 hm²和 6 026 hm²,主要转入来源为耕地。该情景下建设用地高速扩张得到有效控制,增幅有所放缓,为 18.40%。由《西安市土地利用总体规划(2006—2020)》可知,西安市采取了全流域治理、水源保护和生态修复等措施,保障水质保护水环境,故在此基础上生态保护情景模拟的 2030 年水域面积,保障了基础水域的同时面积相比自然增长情景增加了 212 hm²。

耕地保护情景下,建设用地的扩张程度有所放缓,但仍保持着增长趋势,对周边农田侵占没有自然增长情景强烈,且由于保护措施的存在,基本农田面积得到保护,占补平衡政策得到贯彻,因此,至 2030 年模拟出的耕地面积降幅为 4.16%,比自然增长情景低 4.80%,该情景下 2015—2030 年,建设用地面

积增加了 27 826 hm²,林地和草地 2 种地类面积分别下降了 7 137 hm²和 8 074 hm²,2 种地类下降部分面积总和超过了耕地,其中林地主要向草地和建设用地转移,草地主要向林地和建设用地转移。

3.4 不同情景下的碳储量变化分析

西安市 2000—2015 年总碳储量呈现下降趋势,由 1.65×10^8 t 下降为 1.63×10^8 t(图 4),减少了 2.49×10^6 t,城市化进程加快,建设用地迅速向耕地侵占,原本为林地和草地这些高植被覆盖率的高碳密度区域向耕地和建设用地等低碳密度区转化,这是导致该趋势出现的主要原因。在这种变化趋势下,所模拟的自然增长情景下的碳储量持续下降,2015—2030 年总碳储量减少 2.14×10^6 t。

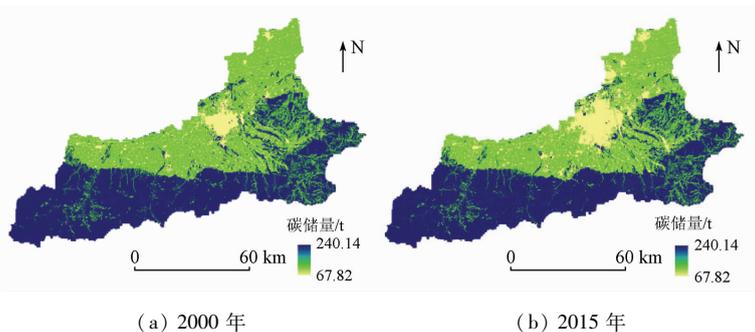


图 4 2000 年和 2015 年碳储量空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of carbon storage in 2000 and 2015

生态保护情景下,2030 年总碳储量在 2015 年基础上增加了 6.92×10^5 t,总量比自然增长情景高 2.83×10^6 t(图 5)。其中林地提供了 6.97×10^7 t,是所有用地类型中最主要的碳储量供给来源,草地的碳储量增加了 2.56×10^6 t,增量上超过了林地。水源保护使得水域的碳储量相比自然增长情景增加了 23 271.24 t。总体来说,采取生态保护措施得到了相当明显的生态效益。生态保护情景限制了林地

和草地的转化,植被碳库得到保存。以地下生物碳为例,林地和草地植物根系的地下生物碳比耕地高,生态保护情景减少林草向耕地转移,保护了森林与草地的碳汇功能。在对水源进行保护和治理的同时也保护了湿地滩涂中的植物,同样起到了保护碳库的作用。采取一定的生态保护措施可以有效地降低碳储量的损失,恢复区域碳储量水平,达到一定的固碳效果,提高区域生态价值。

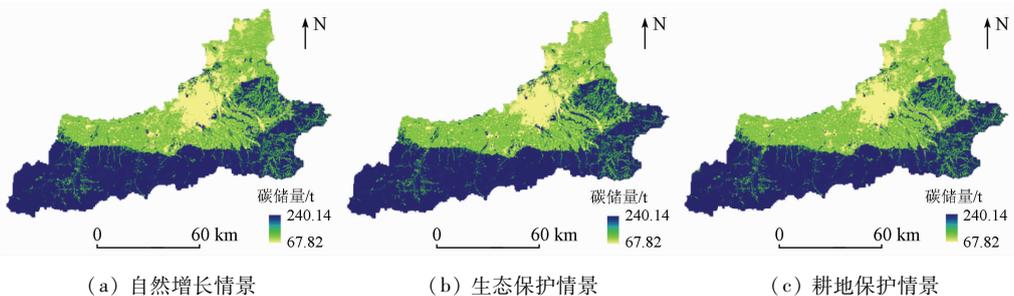


图 5 模拟 2030 年不同情景下的碳储量空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of carbon storage under different scenarios in 2030

耕地保护情景下的碳储量表现出更为强烈的下降趋势,2030 年总碳储量下降为 1.60×10^8 t,比自然增长情景低 1.07×10^6 t。对耕地的保护使得建

设用地扩张转向林地和草地等生态用地,土地利用变化致使高碳密度的植被碳库转移,是造成碳储量下降的主要原因。该情景耕地提供了 3.71×10^7 t

碳储量,比自然增长情景高 1.86×10^6 t,但耕地碳储量增长并未完全弥补林地和草地减少所造成的碳储量损失,相比于自然增长情景,林地的碳储量减少了 1.82×10^6 t,草地碳储量减少了 7.40×10^5 t。虽然耕地保护情景保证了经济效益,但也导致了一定的生态效益损失。

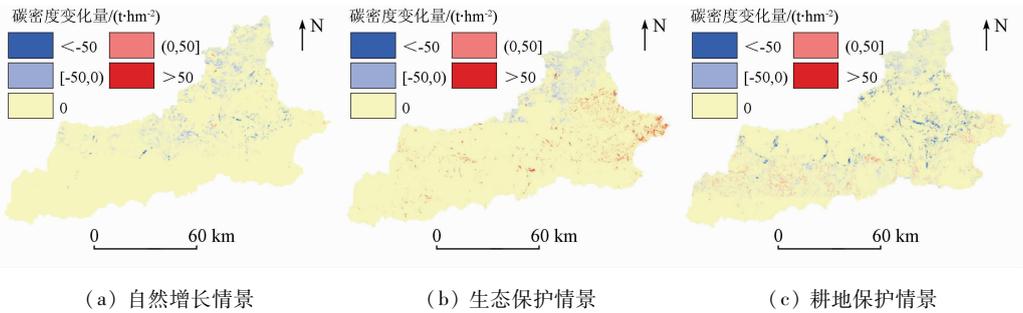


图6 2015—2030年不同情景下碳密度变化量的空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of carbon density changes under different scenarios from 2015 to 2030

由图6可知,2015—2030年3种情景下碳密度变化量主体上虽呈现出不变的趋势,但耕地保护情景碳密度变化更为明显,变化率为6.89%,比自然增长情景高3.18%,比生态保护情景高2.76%。自然增长情景下碳密度降为 168.20 t/hm^2 ,碳密度变化减少区主要集中在北部,整体占比为3.65%,其中较高减少区占全域的3.15%,高减少区仅占0.50%,北部碳密度减少与建设用地向耕地和草地扩张相关。而增长区集中在东部骊山丘陵区,这与东部林地增长所产生的固碳作用有关,虽然75.29%的碳密度增长区都表现出高增长,但全局的占比远低于减少区,仅占全域的0.05%。由碳密度的增减情况及其占比可以得出,自然增长情景下碳密度整体上虽呈现减少趋势,但并未表现为剧烈的减少。

生态保护情景下碳密度增长到 171.16 t/hm^2 ,其中增长区占比提升至1.57%,以高增长区为主,由于生态措施保护了南部秦岭山麓林草的自然演替,南部地区开始表现出增长。碳密度减少区略低于自然增长情景,占比为2.55%,主要集中在高GDP增长的中部、北部,以较高减少区为主,占有减少区的98.56%。与自然增长情景减少区的聚集化相反,生态保护情景下减少区呈现出相对破碎化的分布,或与建设用地向周边耕地扩张有关。

耕地保护情景下碳密度表现出更为显著的下降趋势,2030年碳密度下降为 167.08 t/hm^2 ,其中增长区占比为1.78%,与生态保护情景相似,不同的是以较高增长区为主,结合土地利用转移可以得出,林草转化是造成的增长区增多的主要原因,增长区的主导增长类型转变也表明了该情景下整体碳密度向着更低方向转化,反而降低了整体碳储量水平。

3.5 碳密度变化分析

图6为不同情景下碳密度变化量的空间分布。以 50 t/hm^2 为界,将其划分为5类, $> 50 \text{ t/hm}^2$ 为高增长区、 $(0, 50] \text{ t/hm}^2$ 为较高增长区、 0 t/hm^2 为未变化区、 $[-50, 0) \text{ t/hm}^2$ 为较高减少区、 $< -50 \text{ t/hm}^2$ 为高减少区。

碳密度的减少区占比为5.19%,以较高减少区为主,占有减少区的66.09%。碳密度整体变化率的增高、主导增长区转变以及高减少区的占比扩大,且减少区分布在向东和向南方向所表现出较高的斑块聚集特征,意味着建设用地开始向东部、南部中性扩张,表明该情景对生态全局的影响更为强烈。

4 结论与讨论

基于PLUS模型和InVEST模型对西安市2030年多情景土地利用进行模拟以及碳储量进行评估,得到以下结论:

1) PLUS模型基于LEAS模块和CARS模块更好地挖掘了用地类型的转换概率,能够更加精确模拟景观格局,以西安市为研究区模拟2015年土地利用取得了较高的模拟精度,Kappa系数为0.857。研究区所模拟的区域扩张具有斑块聚集性变化趋势,斑块变化特征也体现了模型在模拟斑块级变化的特点,表明模型在模拟城市斑块生长和复杂景观格局上具有优势。然而与其他模型一样,PLUS模型中存在部分经验性参数设置,经验性参数虽有助于研究者达成模拟需求,但也会造成一定的不确定性影响。

2) 本研究基于PLUS和InVEST模型评估了时间与空间上碳储量变化,然而目前只考虑了土地利用变化,实际上InVEST模拟所需不同用地类型碳密度如林地受树龄变化等因素影响存在动态变化特点。受限于研究区选取的范围和全域采样的难度,未来可通过小范围实验的方式:一方面修正用地类型碳密度参数;另一方面通过在不同年份进行采样确定区域用地类型碳密度动态变化趋势,预测未来

碳密度变化,修正并确定更为准确的碳密度参数设置以提高预测的准确度。

3)通过对西安市碳储量时空变化进行模拟与预测发现,现行土地利用转移趋势使得高碳密度用地转向低碳密度用地,降低区域碳储量水平。为维持与恢复区域碳储量水平,本研究综合考虑构建了多种土地利用情景,分析政策措施因素可能导致的碳储量变化。发现采用生态保护措施,可以有效保障东部、南部林草的自然演替,有助于恢复区域碳储量水平。以此为依据,未来城市规划中在保证基本农田的基础上综合考虑采取更多的生态措施,同时在建设用地基本增长的前提下控制扩张速度,有助于维持区域碳储量水平,调控区域气候,达成碳中和的政策需求。

参考文献(References):

- [1] 张燕,师学义,唐倩.不同土地利用情景下汾河上游地区碳储量评估[J].生态学报,2021,41(1):360-373.
Zhang Y, Shi X Y, Tang Q. Carbon storage assessment in the upper reaches of the Fenhe River under different land use scenarios[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(1):360-373.
- [2] 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.
Zhu Z Q, Ma X S, Hu H. Spatio-temporal evolution and prediction of ecosystem carbon stocks in Guangzhou City by coupling FLUS-InVEST models[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(2):222-229.
- [3] 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. Temporal and spatial variation of carbon storage in the Shule River basin on InVEST model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(10):4052-4065.
- [4] Jiang W G, Deng Y, Tang Z H, 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[J]. Ecological Modelling, 2017, 345:30-40.
- [5] 韩艳莉,陈克龙,于德永.土地利用变化对青海湖流域生境质量的影响[J].生态环境学报,2019,28(10):2035-2044.
Han Y L, Chen K L, Yu D Y. Evaluation on the impact of land use change on habitat quality in Qinghai Lake basin[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2019, 28(10):2035-2044.
- [6] 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.
Wang G, Wang J W. Study on the impact of land use change on habitat quality in Dandong coastal area[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2021, 30(3):621-630.
- [7] 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[J].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[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(3):446-459.
- [8] Zhao M, He Z, Du J, et al. Assessing the effects of ecological engineering on carbon storage by linking the CA-Markov and InVEST models[J]. Ecological Indicators, 2019, 98:29-38.
- [9] 史名杰,武红旗,贾宏涛,等.基于 MCE-CA-Markov 和 InVEST 模型的伊犁谷地碳储量时空演变及预测[J].农业资源与环境学报,2021,38(6):1010-1019.
Shi M J, Wu H Q, Jia H T, et al. Temporal and spatial evolution and prediction of carbon stocks in Yili Valley based on MCE-CA-Markov and InVEST models[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2021, 38(6):1010-1019.
- [10] 吴佩君,刘小平,黎夏,等.基于 InVEST 模型和元胞自动机的城市扩张对陆地生态系统碳储量影响评估——以广东省为例[J].地理与地理信息科学,2016,32(5):22-28.
Wu P J, Liu X P, Li X, et al. Impact of urban expansion on carbon storage in terrestrial ecosystems based on InVEST model and CA: A case study of Guangdong Province, China[J]. Geography and Geo-Information Science, 2016, 32(5):22-28.
- [11] Liang Y, Liu L, Huang J. Integrating the SD-CLUE-S and InVEST models into assessment of oasis carbon storage in northwestern China[J]. Plos One, 2017, 12(2):e0172494.
- [12] Liang X, Guan Q, Clarke K C, et al. Understanding the drivers of sustainable land expansion using a patch-generating land use simulation (PLUS) model: A case study in Wuhan, China[J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2021, 85:101569.
- [13] Liu X P, 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[J]. Landscape and Urban Planning, 2017, 168:94-116.
- [14] 喇露梦,勾蒙蒙,李乐,等.三峡库区生态系统服务权衡时空动态与情景模拟:以秭归县为例[J].生态与农村环境学报,2021,37(11):1368-1377.
La L M, Gou M M, Li L, et al. Spatiotemporal dynamics and scenarios analysis on trade-offs between ecosystem Service in three gorges reservoir area: A case study of Zigui County[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2021, 37(11):1368-1377.
- [15] 柯新利,普鹏鹏,杨柏寒,等.耕地保护对生态系统水源涵养功能的影响——以武汉市为例[J].水土保持研究,2018,25(1):391-396.
Ke X L, Pu K P, Yang B H, et al. Impacts of cultivated land protection on water retention function of ecosystem: A case study in Wuhan[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(1):391-396.
- [16] Babbar D, Areendran G, Sahana M, et al. Assessment and prediction of carbon sequestration using Markov chain and InVEST model in Sariska Tiger Reserve, India[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 278:123333.
- [17] Sharp R, Douglass J, Wolny S, et al. InVEST 3.8.9 User's Guide [Z]. The Natural Capital Project, Stanford University, University of Minnesota, the Nature Conservancy, and World Wildlife Fund, 2020.
- [18] 柯新利,唐兰萍.城市扩张与耕地保护耦合对陆地生态系统碳储量的影响——以湖北省为例[J].生态学报,2019,39(2):672-683.

Ke X L, Tang L P. Impact of cascading processes of urban expansion and cropland reclamation on the ecosystem of a carbon storage service in Hubei Province, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(2): 672–683.

[19] Lyu R F, Mi L N, Zhang J M, et al. Modeling the effects of urban expansion on regional carbon storage by coupling SLEUTH-3r model and InVEST model[J]. *Ecological Research*, 2019, 34(3): 380–393.

Spatial – temporal change and prediction of carbon stock in the ecosystem of Xi’an based on PLUS and InVEST models

YANG Lianwei¹, ZHAO Juan¹, ZHU Jiatian¹, LIU Lei¹, ZHANG Ping^{1,2}

(1. *School of Environmental and Chemical Engineering, Xi’an Polytechnic University, Xi’an 710600, China*; 2. *Shaanxi Key Laboratory of Land Consolidation, Xi’an 710075, China*)

Abstract: Land use can cause carbon stock changes by affecting the structural layouts and functions of terrestrial ecosystems. Therefore, research on the relationship between land use changes and carbon stock is greatly significant for optimizing regional land use patterns and making sensible ecological decisions. This study predicted the spatial – temporal changing characteristics of land use and carbon stock in Xi’an under different scenarios in the future using the PLUS and InVEST models and investigated the impact of land use changes on carbon stock. The results are as follows. From 2000 to 2015, the expansion of construction land and the transfer of high – carbon – density land reduced the carbon stock of Xi’an by 2.49×10^6 t. From 2015 to 2030 the carbon stock continuously declined by 2.14×10^6 t in the natural growth scenario, and the carbon stock of Xi’an will increase by 6.92×10^5 t in the ecological protection scenario due to the measures taken for land protection and transfer control. In the cultivated land protection scenario, the cultivated land will be protected, but the high – carbon – density land such as woodland and grassland will be affected by the expansion of construction land during 2015—2030, reducing the carbon stock to 1.60×10^8 t. As indicated by the analysis of carbon density change, ecological protection measures can increase the changing rate of carbon density. Compared with the natural growth scenario, the ecological protection scenario will increase the proportion of areas with increased carbon density (mainly high – increase areas) from 0.05% to 1.57%. By contrast, under the cultivated land protection scenario, the carbon density will decrease, and high – increase areas will be transformed into moderately – high – increase areas. Based on cultivated land protection, it is necessary to take proper ecological protection measures in the future land use planning of Xi’an to control the rapid expansion of construction land from cultivated and forest land. Optimizing land use patterns can effectively reduce the loss of carbon stock, improve the level of regional carbon stock, and achieve regional sustainable development.

Keywords: land use change; PLUS model; InVEST model; Xi’an City; carbon storage

(责任编辑: 张 仙)