



农业资源与环境学报

中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

基于MCE-CA-Markov和InVEST模型的伊犁谷地碳储量时空演变及预测

史名杰, 武红旗, 贾宏涛, 朱磊, 董通, 何盘星, 杨强军

引用本文:

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.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0586>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于MCE-CA耦合模型的嘉兴市土地利用预测情景下生态敏感性评价

荣月静, 张慧, 赵显富

农业资源与环境学报. 2015(4): 343–353 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2014.0359>

基于土地利用的北方农牧交错区碳固定和土壤保持时空变化

常虹, 杨武, 石磊, 刘亚红, 邱晓, 伊风艳, 孙海莲

农业资源与环境学报. 2021, 38(3): 484–493 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0310>

西部绿洲城市土地利用转型的生态环境效应——以乌鲁木齐市为例

阿依吐尔逊·沙木西, 刘新平, 祖丽菲娅·买买提, 陈前利, 冯彤

农业资源与环境学报. 2019, 36(2): 149–159 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0113>

基于CA-Markov模型和MCE约束的白洋淀流域景观动态研究

张晨星, 徐晶晶, 温静, 杨新兵, 王佳欢, 赵波

农业资源与环境学报. 2021, 38(4): 655–664 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0415>

京津冀潮白河区域土地利用变化对生态系统服务的影响

耿冰瑾, 曹银贵, 苏锐清, 刘施含, 冯喆

农业资源与环境学报. 2020, 37(4): 583–593 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0595>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

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.



开放科学 OSID

基于 MCE-CA-Markov 和 InVEST 模型的伊犁谷地碳储量时空演变及预测

史名杰^{1,2}, 武红旗^{1,2*}, 贾宏涛^{1,2}, 朱磊^{1,2}, 董通^{1,2}, 何盘星¹, 杨强军^{1,2}

(1. 新疆农业大学草业与环境科学学院, 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆土壤与植物生态过程重点实验室, 乌鲁木齐 830052)

摘要: 陆地生态系统碳源与碳汇的变化与土地利用/覆被变化(LUCC)的演变密切相关, 为探讨土地利用变化对陆地生态系统碳储量的影响机制, 基于 1980—2020 年 LUCC 数据集, 通过多评价准则(Multi-criteria evaluation, MCE)的元胞自动机(Cell automata, CA)和马尔科夫链(Markov chain)模型, 模拟伊犁谷地 2030 年的 LUCC 时空动态, 耦合 InVEST 模型探讨土地利用变化下伊犁谷地 1980—2030 年陆地生态系统碳储量的时空演变格局。结果表明, MCE-CA-Markov 模型预测 LUCC 数据集与 2000、2010 年和 2020 年实际 LUCC 精度检验的 Kappa 系数分别为 0.929 1、0.875 5 和 0.929 7, 模型模拟普适性较高, 可对后续碳储量时空演变格局进行精准评估。利用 InVEST 模型估算的伊犁谷地 1980 年总碳储量约为 1 114.95 Tg, 预计至 2030 年总碳储量呈逐期下降趋势, 累计净减少 65.94 Tg, 其中林草地面积的退缩是致使碳储量下降的主导因素。伊犁谷地碳储量空间分布总体上表现为高值区域环绕低值区域, 呈嵌套分布。碳密度的高值区域分布在南部和北部山区林草地, 而低值区域仅集中在中部河谷平原附近。研究土地利用变化对陆地生态系统碳储量的影响可为研究区碳库管理提供数据支持, 为制定碳固存和环境保护政策提供理论参考。

关键词: 土地利用变化; 碳储量; MCE-CA-Markov; InVEST; 伊犁谷地

中图分类号: X171

文献标志码: A

文章编号: 2095-6819(2021)06-1010-10

doi: 10.13254/j.jare.2020.0586

Temporal and spatial evolution and prediction of carbon stocks in Yili Valley based on MCE-CA-Markov and InVEST models

SHI Mingjie^{1,2}, WU Hongqi^{1,2*}, JIA Hongtao^{1,2}, ZHU Lei^{1,2}, DONG Tong^{1,2}, HE Panxing¹, YANG Qiangjun^{1,2}

(1. College of Grassland and Environment Sciences, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 2. Xinjiang Key Laboratory of Soil and Plant Ecological Processes, Urumqi 830052, China)

Abstract: Changes in carbon sources and sinks in terrestrial ecosystems are closely related to the evolution of land use/cover change (LUCC). The mechanisms of land use change on carbon stocks in terrestrial ecosystems were investigated to provide theoretical references to understand the influence of spatio-temporal evolution patterns on regional carbon stocks. Based on the LUCC data of 1980—2020, the spatio-temporal dynamics of LUCC of the Yili Valley in 2030 were simulated through multi-criteria evaluation (MCE), cellular automata (CA), and Markov chain models. InVEST model explored the spatio-temporal evolution pattern of carbon stocks in the Yili Valley terrestrial ecosystem from 1980 to 2030 under the land use change. The results showed that the MCE-CA-Markov model predicted LUCC data set and the actual LUCC in 2000, 2010, and 2020, and their Kappa coefficients were 0.929 1, 0.875 5, and 0.929 7, respectively, indicating that model simulation was highly generalized and could be used to accurately assess the spatio-temporal evolution of carbon stocks in subsequent years; the InVEST model estimated that the total carbon stock of the Yili Valley was 1 114.95 Tg in 1980, and it would show a decreasing trend until 2030, with a cumulative net decrease of 65.9 Tg. The retreat of forest and grassland area was the dominant factor leading to the decrease in carbon stock; and the spatial distribution of carbon stocks in the Yili Valley was generally

收稿日期: 2020-10-12 录用日期: 2021-01-13

作者简介: 史名杰(1996—), 男, 新疆阜康人, 硕士研究生, 研究方向为土地利用变化遥感。E-mail: shimj1224@163.com

*通信作者: 武红旗 E-mail: hqw7475@126.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(41561019)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(41561019)

<http://www.aed.org.cn>

characterized by a nested distribution of high value areas around low value areas. The high value areas of carbon density were distributed in the southern and northern mountainous forests and grasslands, while the low value areas were concentrated in the central valley plains. Studying the impacts of land use change on the carbon stock of terrestrial ecosystems can provide data support for carbon pool management in the study area, and subsequently, provide theoretical reference for the formulation of carbon sequestration and environmental protection policies.

Keywords: land use change ; carbon storage; MCE-CA-Markov; InVEST; Yili Valley

陆地生态系统中的碳是全球碳储量的重要组成部分,在降低大气中CO₂等温室气体浓度、减缓全球气候变暖等方面发挥着重要的作用^[1]。土地利用/覆被变化(Land use/cover change, LUCC)是碳源与碳汇时空分异格局演变的主导因素之一^[2],其影响程度取决于生态系统的类型和土地利用方式的转变。土地利用的转变通过改变生态系统的结构和功能影响碳储量格局及动态,对土壤和植被的固碳能力具有重要的影响^[3]。因此,探寻土地利用结构优化格局对改善区域生态系统服务功能及减缓全球气候变化具有重要意义。

当前,土地利用模拟模型与陆地生态系统碳储量模型的结合,被广泛应用于碳储量估算及其未来空间变化过程的研究当中^[4-5]。在众多量化生态系统服务功能的模型中,生态系统服务评估模型(Integrated valuation of ecosystem services and trade-offs, InVEST)因参数调整灵活、评估结果可空间化表达等优点,在生态系统服务评估中得到了广泛的应用^[5-6]。近年来,众多学者^[5-7]应用土地利用模拟模型预测未来LUCC景观格局变化,并结合InVEST模型评估区域生态系统服务功能。如:在国家尺度上,研究学者利用FLUS模型结合InVEST模型,对中国的未来LUCC变化及碳储量进行了预测与评估^[6]。雷军成等^[7]在五马河流域的研究表明,利用CLUE-S模型模拟2030年未来LUCC景观格局,并结合InVEST模型评估区域陆地生态系统服务功能。ZHAO等^[5]在黑河流域的研究中,应用CA-Markov模型和InVEST模型估算生态工程指引下的碳储量时空分异格局。上述研究证实了LUCC模拟模型结合InVEST模型对于未来生态系统服务功能研究的优势。但是,目前针对未来陆地生态系统碳储量的研究仍存在评价准则不统一、预测未来时期的研究缺乏、模型未能本地化等问题^[8]。本研究基于多评价准则MCE(Multi-criteria evaluation, MCE)的元胞自动机(Cell automata, CA)和马尔科夫链(Markov chain)模型,通过分析影响目标的多重驱动因素,精确地辅助并判断不同土地类型的转移数

量^[9]。同时MCE以土地利用转移概率及适宜性图集为基础,既能有效地模拟未来LUCC空间变化,又可以有效地提高土地利用预测的精度^[8]。因此,构建MCE-CA-Markov多评价准则预测未来时期的LUCC,耦合InVEST模型探讨未来时期区域陆地生态系统碳储量的时空分异格局,是满足碳储量长时间序列评估及未来动态监测的迫切需求。

伊犁谷地是新疆天山北坡一个相对完整的生态系统功能服务区,同时也是构建国家生态环境保护屏障的重要区域。新疆地区年均气温与降水呈波动上升趋势^[10],伊犁谷地是半湿润气候,西风带的湿润气流受高大山脉的阻拦在伊犁谷地形成丰沛的降水,伊犁谷地的生态环境在整个干旱半干旱地区具有典型性和代表性。随着社会经济的发展,城市建设用地急速扩张、人类过度砍伐森林以及林草地变更为农业用地导致大气中CO₂排放明显增多^[11]。伊犁谷地作为陆上丝绸之路的关键枢纽带,其土地利用质量直接关系到伊犁谷地的综合效益与生态安全,加强土地利用变化的研究,已成为当前解决该区域陆地生态系统碳储量问题的迫切需要。

本研究基于1980—2020年LUCC数据图集,应用MCE-CA-Markov模型预测2030年的土地利用格局,并结合InVEST模型探讨伊犁谷地LUCC景观格局变化下的碳储量时空分异演变,确定陆地生态系统土地利用长时间及未来时间序列变化下碳源与碳汇的空间分布,为提出科学的土地利用规划方案和城市扩张应对措施提供决策依据,有利于实现“谷地-平原-森林”陆地生态系统的可持续发展。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

伊犁谷地位于中国天山山脉西部,地理位置为80°09'~84°56'E, 42°14'~44°50'N(图1)。研究区气候湿润,年平均气温6.68℃,年平均降水量332.69 mm,山区年均降水量在300~900 mm之间,属于温带大陆性气候,年均日照时数2 842.2 h,昼夜温差大,是

新疆最湿润的地区^[12]。伊犁谷地东部顶点为特克斯与巩乃斯河交汇处,西部底边朝向中哈边界,地势东高西低。东西长360 km,南北宽275 km,伊犁谷地的植被类型主要有荒漠植被、草原、草甸、森林和隐域植被五大类。

1.2 数据获取与预处理

本研究用于模拟2030年土地利用的数据集主要包括:①土地利用数据,以1980、1990、2000、2010年和2018年共5期分辨率30 m的LUCC为历史条件数据,其中2020年的LUCC数据由2018年LUCC数据结合2020年7月1日至8月1日高分一号遥感影像通过目视解译更新获得,结合野外调查、目视判读与混淆矩阵判断,解译总精度超过85%,根据国家土地利用一类分类系统划分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用土地6种类型^[13];②气候数据,用于判别不同土地类型的适宜性条件;③环境因素数据,用于驱动土地利用变化的自然环境因素主要有地形、气候、地下水等;④社会经济数据,用于驱动土地利用变化的社会经济数据主要包含人口空间分布、国内生产总值(GDP)、公里网格栅格数据和公路网、河流水系等矢量数据(表1)。

本研究用于估算碳储量的数据集主要包括:①地上与地下生物量碳密度数据,来自于美国航空航天局

(National Aeronautics and Space Administration, NASA)的地球数据集ORNL DAAC;②土壤碳密度数据,在不同土地类型下各挖取3~5个土壤剖面,采样深度为0~10、10~20、20~50 cm和50~100 cm,用重铬酸钾外加热法测得有机碳含量,结合质地、厚度、容重等土壤理化性质计算土壤有机碳密度,测定方法依据《土壤农化分析》与分层法计算各土层土壤碳密度^[17-18];③凋落物碳密度数据,选取公开发表的碳储量实测论文^[14-16],主要选取2000—2020年公开发表的论文并且选择新疆维吾尔自治区的实测采样数据。对于以上方法无法获取的碳密度数据,选取全国的碳密度数据进行校正。

1.3 研究方法

1.3.1 CA-Markov模型

CA-Markov是Markov和CA模型的结合。CA模型是模拟复杂空间过程的有效工具,每一个元胞都受其相邻元胞及自身的元胞特征变化影响^[19]。CA模型是一种在时间和空间上都离散的模型,CA模型可用公式(1)表示:

$$S_{t+1} = f(S_t, N) \quad (1)$$

式中: S 为元胞有限且离散的集合; $t, t+1$ 为不同时刻; N 为元胞的邻域; f 为局部空间的元胞转化规则。

LUCC预测包括 t_1 到 t_2 时期之间的土地利用变

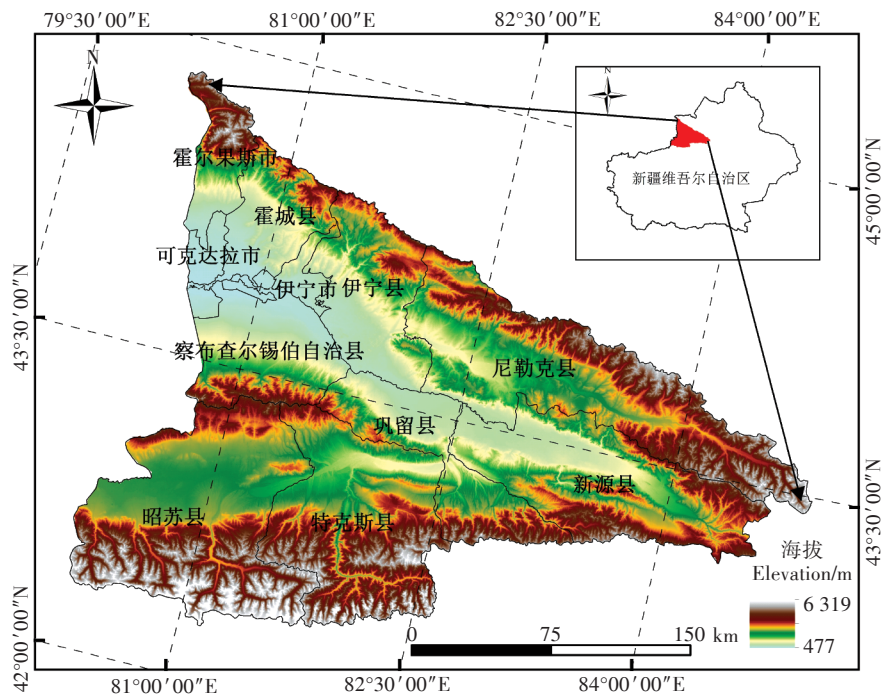


图1 研究区高程示意图

Figure 1 Elevation diagram of the study area

表 1 模拟未来时期 LUCC 所需数据及来源

Table 1 Data and sources needed by LUCC simulation in the future period

数据 Data	数据属性 Data attributes	年份 Year	空间分辨率 Spatial resolution	数据来源 Data source
土地利用类型	—	1980、1990、2000、2010、2018、2020	30 m	中科院资源环境科学数据中心 http://www.resdc.cn/
气候背景	年均积温	2010	1 km	中科院资源环境科学数据中心 http://www.resdc.cn/
	年均降水量	1990、2000、2010、2015	1 km	中科院资源环境科学数据中心 http://www.resdc.cn/
	年均气温	1990、2000、2010、2015	1 km	中科院资源环境科学数据中心 http://www.resdc.cn/
	—	—	—	—
自然因素	高程	—	30 m	地理空间数据云 http://www.gscloud.cn/
	坡度	—	30 m	地理空间数据云 http://www.gscloud.cn/
	地下水深度	—	1 km	新疆平原区地下水埋深分区图
社会经济	人口	1990、2000、2010、2015	1 km	中科院资源环境科学数据中心 http://www.resdc.cn/
	国内生产总值	1990、2000、2010、2015	1 km	中科院资源环境科学数据中心 http://www.resdc.cn/
	公路网	2010	—	国家地球系统科学数据中心 http://www.geodata.cn/
	河流水系	2010	—	国家地球系统科学数据中心 http://www.geodata.cn/
碳密度	地上生物量碳密度	2010	300 m	NASA 地球数据集市网站 ORNL DAAC, https://daac.ornl.gov
	地下生物量碳密度	2010	300 m	NASA 地球数据集市网站 ORNL DAAC, https://daac.ornl.gov
	土壤碳密度	—	—	基于土壤剖面的实测数据
	凋落物碳密度	—	—	以朱超等 ^[14] 、王鑫等 ^[15] 文献数据为主,李克让等 ^[16] 文献数据为辅

化,并将这些变化发生的概率过渡到未来。Markov 链是一种随机级数,通过转移矩阵的过渡概率来分析 LUCC 随时间变化的概率^[20]。Markov 链的转移矩阵表达式为:

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

$$0 \leq P_{ij} \leq 1, \text{ 且 } \sum_{j=1}^n P_{ij} = 1 \quad (i, j = 1, 2, \cdots, n) \quad (2)$$

式中:如果转移概率随时间而变化,则需要将上述矩阵计算为函数 k ; n 为第 n 年的土地利用类型。

1.3.2 MCE 多评价准则

MCE (Multi-criteria evaluation) 模块的综合分析可影响目标的诸多因素,为实现未来土地利用变化提供决策辅助。限制性因子将驱动因素严格控制在某种范围之内,以 0 和 1 表示。根据 MCE 模块生成的适宜性图像集来定义演化规则, MCE-CA-Markov 的适宜性图像集可为元胞在下一时刻的状态提供决策目标。MCE-CA-Markov 多评价准则方法可以提高模型模拟精度,且对未来时期的 LUCC 预测结果更为可靠^[8]。

本研究基于 IDRISI Selva 17.0 平台,分别提取 1980—1990、1990—2000、2000—2010 年和 2010—2020 年共 4 个时期的转移矩阵概率,选取地下水深度、降水量、DEM、坡度、 ≥ 10 °C 积温、与道路距离、与

水系距离、GDP 和人口数量 9 个约束性因子,将水体和建设用地作为限制性条件。采用层次分析法通过构建判断矩阵来确定各因素的权重,设置领域元胞大小为 5×5 ,分别模拟 2000、2010、2020 年土地利用现状,并与实际 LUCC 进行对比分析,进而选取模型模拟参数的最优组合对伊犁谷地 2030 年 LUCC 进行模拟。

1.3.3 InVEST 模型

本研究运用 InVEST 3.5.0 模型中的 Carbon 模块分析伊犁谷地 1980—2030 年的碳储量时空分异格局。此模块将陆地生态系统的碳储量分为:地上生物量碳库(指树叶、树皮、树枝、树干和地表以上其他存活的植被)、地下生物量碳库(指地下存活根系中的有机碳)、土壤中的碳库(指土壤中的有机碳)和死亡有机碳库(指死亡的植被及枯枝落叶中所含的有机碳)四个碳库^[21]。模型的计算公式为:

$$C_k = C_{i-\text{above}} + C_{i-\text{below}} + C_{i-\text{soil}} + C_{i-\text{dead}} \quad (3)$$

$$C_{\text{total}} = \sum_{k=1}^n A_k \times C_k \quad (k = 1, 2, \cdots, n) \quad (4)$$

式中: $C_{i-\text{above}}$ 是植物地上生物量的碳密度, $\text{Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$; $C_{i-\text{below}}$ 是植物地下生物量碳密度, $\text{Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$; $C_{i-\text{soil}}$ 指土层中土壤有机碳密度, $\text{Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$; $C_{i-\text{dead}}$ 指凋落物中的有机质碳密度, $\text{Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$; C_{total} 为总碳储量, Mg ; A_k 是每种土地类型覆盖的总面积, hm^2 ; n 表示土地利用类型的总数。碳密度和碳储量均以 C 计。

输入合理的参数是模拟精确性的保证,因此选

择合适的碳密度数据是模拟碳储量的关键。对于实测土壤剖面数据与NASA数据集无法获取的碳密度数据,采用文献[22-23]中碳密度与气候因子的线性相关性方程进行参数修正,其结论已成功在其他学者的研究中得到印证^[24],修正后的碳密度数据如表2所示。

1.3.4 土地利用动态变化率

土地利用动态变化率用来描述研究区某一土地利用类型在一定时间段内的变化率,能够表现土地利用空间动态变化的强度,对分析碳储量时空变化趋势提供依据^[26]。公式为:

$$R_s = \frac{U_b - U_a}{U_a} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (5)$$

式中: R_s 为某一土地利用类型在研究期间的年变化率; U_a 和 U_b 分别表示研究初时期值和后时期值的土地利用类型的面积; T 为研究期的时间长度。

1.3.5 精度验证

以伊犁谷地2000年实际LUCC为底图,运用MCE-CA-Markov模型基于1980年和1990年的LUCC模拟出2000年LUCC模拟图,利用IDRISI平台的Crosstab模块进行精度验证。优化数据集参数后模拟2010年与2020年伊犁谷地LUCC,并与实际的2010年与2020年LUCC进行对比分析。最终选取最优参数合集模拟2030年伊犁谷地的LUCC景观格局。

2 结果与分析

2.1 伊犁谷地1980—2030年土地利用时空分布格局

运用MCE-CA-Markov模型模拟2000、2010年和2020年LUCC,并与实际LUCC进行精度验证,Kappa系数分别为0.929 1、0.875 5和0.929 7,表明模拟研究

区的LUCC精度较高,且能够适用于本研究需求。进而选取最优参数合集模拟2030年LUCC,探讨伊犁谷地1980—2030年(6期)土地利用变化及动态特征(图2)。

伊犁谷地的土地类型以草地为主,其面积占比超过58%(图3)。该区域LUCC在时间分布上呈现不同的变化趋势。历史时期(1980—2000年),耕地面积持续扩张,由6 968.85 km²增加至7 222.12 km²;林地面积呈缩减趋势,由6 394.92 km²减少至6 330.19 km²。当前时期(2000—2020年)耕地面积扩张迅速,由7 222.12 km²增加至9 357.46 km²;林地面积在当前时期损失严重,由6 330.19 km²缩减至3 603.16 km²。预计未来时期(2020—2030年)耕地面积将进一步扩张至10 175.24 km²,而林地面积缩减至3 540.23 km²。

由图4分析得出,伊犁谷地1980—2030年期间耕地面积扩张明显,预计其面积增加46.01%,耕地面积的土地动态变化率分别为0.04%、0.33%、2.20%、0.62%和0.87%,耕地的大规模扩张导致伊犁河与特克斯河附近的草地和林地的覆盖面积锐减;其中林地损失最为严重,面积减少了44.63%,其土地面积的动态变化率分别为0.01%、-0.11%、-4.01%、-0.50%、和-0.17%。

2.2 伊犁谷地1980—2030年碳储量时空分布格局

经InVEST模型碳储量模块估算得出1980、1990、2000、2010、2020年和2030年的总碳储量分别为1 114.95、1 115.04、1 106.95、1 069.37、1 059.56 Tg和1 049.01 Tg。1980—2030年期间总碳储量年平均减少1.31 Tg,50年间年均减少率为1.30%。1980—2030年伊犁各地类碳储量占比见图5。

表2 不同土地利用类型碳密度(Mg·hm⁻²)

Table 2 Carbon density of land use types in the study area(Mg·hm⁻²)

土地利用类型 Land use type	$C_{i-above}$	$C_{i-below}$	C_{i-soil}	C_{i-dead}	参考文献 Reference
耕地 Cropland	5.44	2.57	123.83*	1.24	SPAWN等 ^[25] 、李克让等 ^[16]
林地 Forest	37.36	15.60	300.70*	3.05	SPAWN等 ^[25] 、李克让等 ^[16]
草地 Grassland	8.58	7.24	205.22*	0.36	SPAWN等 ^[25] 、李克让等 ^[16]
水域 Waters	0.93	0.66	82.20	1.23	SPAWN等 ^[25] 、李克让等 ^[16]
建设用地 Construction land	3.29	2.11	78.20	0.00	SPAWN等 ^[25] 、朱超等 ^[14]
未利用地 Unused land	0.75	0.98	56.50*	0.00	SPAWN等 ^[25] 、王鑫等 ^[15]

注:带*数据为基于1 m深度下不同土地利用类型的土壤剖面实测数据; $C_{i-above}$ 为土地利用类型*i*植被地上生物量的碳密度; $C_{i-below}$ 为土地利用类型*i*植被根系的地下生物量碳密度; C_{i-soil} 为土地利用类型*i*土壤中的碳密度; C_{i-dead} 为土地利用类型*i*植被枯落物中的碳密度。

Note: * indicates data measured at 1 m depth soil profiles for different land use types; $C_{i-above}$ is the carbon density of above-ground biomass of vegetation of land-use type *i*; $C_{i-below}$ is the carbon density of below-ground biomass of roots of vegetation of land-use type *i*; C_{i-soil} is the carbon density of soil of land-use type *i*; C_{i-dead} is the carbon density in vegetation litter for land use type *i*.

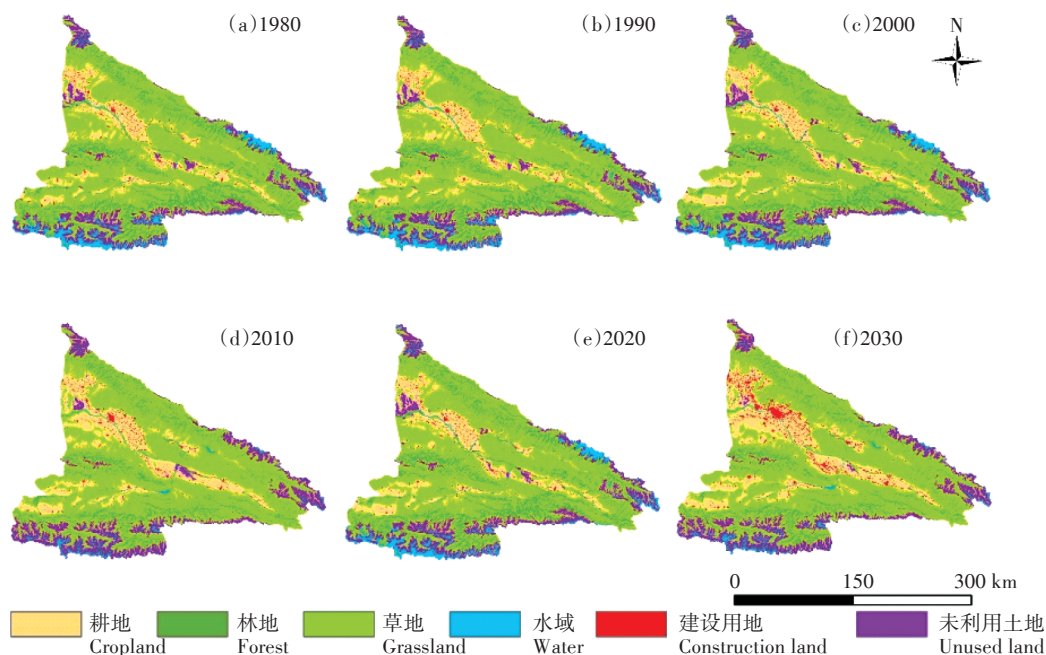


图2 伊犁谷地1980—2030年LUCC时空演变格局

Figure 2 Spatial and temporal evolution pattern of LUCC from 1980 to 2030 in the Yili Valley

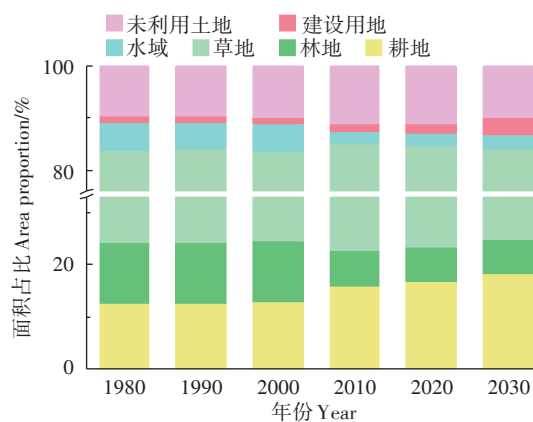


图3 伊犁谷地1980—2030年不同土地利用类型面积占比

Figure 3 Area proportion of different land use types from 1980 to 2030 in the Yili Valley

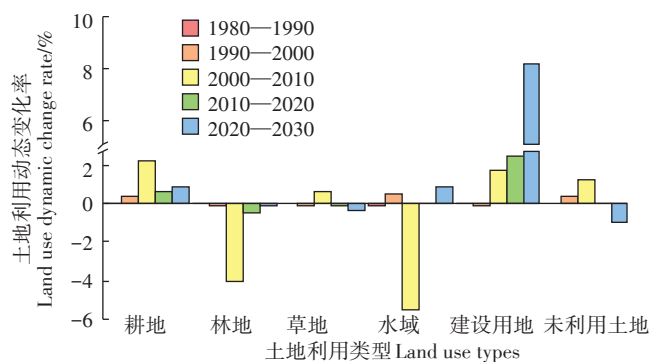


图4 伊犁谷地1980—2030年土地动态变化率

Figure 4 Dynamic change rate of land use from 1980 to 2030 in the Yili Valley

图6反映了伊犁谷地1980—2030年期间不同土地类型变化导致的碳储量的动态变化特征(ArcGIS 10.2中图例是表征栅格像元的属性数据,故图例的单位是碳密度的单位,碳储量由像元数量乘以碳密度计算得到)。经计算,林地和草地的缩减使得碳储量分别净损失101.83 Tg和4.75 Tg。其中林地碳释放最为严重,约占总碳储量累计释放量的95.54%。

1980—2000年伊犁谷地部分草地转换为耕地,由草地面积缩减导致的碳储量减少量为10.88 Tg,占50年间草地总减少量的21.01%。2000—2020年伊犁谷地大量林地转为耕地、草地与建设用地,这致使林

地缩减导致的碳储量净损失97.27 Tg,仅在2000—2010年,就累计减少了90.46 Tg,占50年间林地碳储量总减少量的88.83%。2020—2030年,由于耕地面积的扩张,碳储量将呈潜在增加趋势,碳储量预计增量为10.88 Tg,占50年间耕地总碳储量净增加的25.50%。总体而言,伊犁谷地1980—2030年期间,林地与草地面积大幅减少导致碳释放大幅增加,由于碳密度较高的林地转化为碳密度较低的其他土地类型,其固碳能力大幅下降,总碳储量也呈逐期下降趋势。

2.3 土地利用类型转换对碳储量时空分异的影响

通过模型构建器对总碳储量图进行批处理,统计

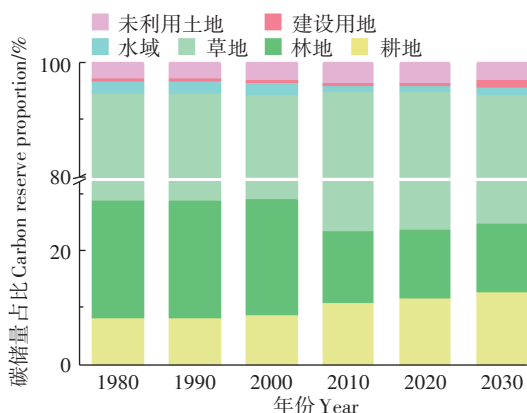


图5 伊犁谷地1980—2030年各地类碳储量占比

Figure 5 The proportion of carbon storages for different land use type from 1980 to 2030 in the Yili Valley

分析得出土地类型的转移时空分布格局与碳储量转移量(图7)。在时间序列上,1980—2030年期间每10年林地转为耕地、草地、水域、建设用地和未利用土地净释放的碳储量总和分别为5.12、44.64、2.07、2.08 Tg和3.01 Tg。此外,未利用土地转向耕地、林地、草地和水域碳储量的净固持量总和分别为3.76、1.95、29.67 Tg和0.66 Tg。然而,碳储量的净固持量远小于净释放量,因此伊犁谷地总体固碳能力呈明显下降趋势(图8)。

在空间分异上,碳储量的增减与各个地类的面积呈正相关关系。随着土地覆被面积的扩大,其碳储量也随之增加,反之亦然(图9)。林地面积锐减、耕地与城市建设用地面积大幅扩张是导致碳储量变化的

最主要原因。昭苏县是碳储量降幅最大的区域,由于该县的土壤质地优良且耕地面积占比较大,同时该县林地面积大幅下降,预计2030年该县耕地面积相较于1980年扩张率为69.40%,而林地面积缩减率为44.67%,进而导致固碳能力大幅下降,总碳储量累计净损失11.52 Tg。

3 讨论

本研究利用伊犁谷地1980—2020年土地利用数据集,并结合不同地类的适宜性图集,基于MCE-CA-Markov耦合InVEST模型对伊犁谷地1980—2030年碳储量的景观格局及动态进行评估与预测。研究发现:在空间分布上,伊犁谷地未来的土地利用类型在景观配置上有所不同,导致陆地生态系统碳储量具有广泛的空间分异^[27];在时间序列上,伊犁谷地1980—2020年土地利用发生变化的像元主要集中在伊犁河、特克斯河和巩乃斯河等流域,多分布在人类活动较为频繁的河谷平原区域。预测至2030年,随着伊犁谷地城市化的不断发展,林地、草地、湿地等陆地生态用地也被相继侵占,耕地与建设用地类型的面积发生显著变化^[28]。

运用InVEST模型分析得出伊犁谷地各个地类的碳密度由大到小依次为林地、草地、耕地、水域、建设用地及未利用土地。由于林地转化为草地或耕地时,大部分地上生物量以碳的形式释放到大气中,同时树木的根系也会分解释放大量碳,因此森林转化为草地

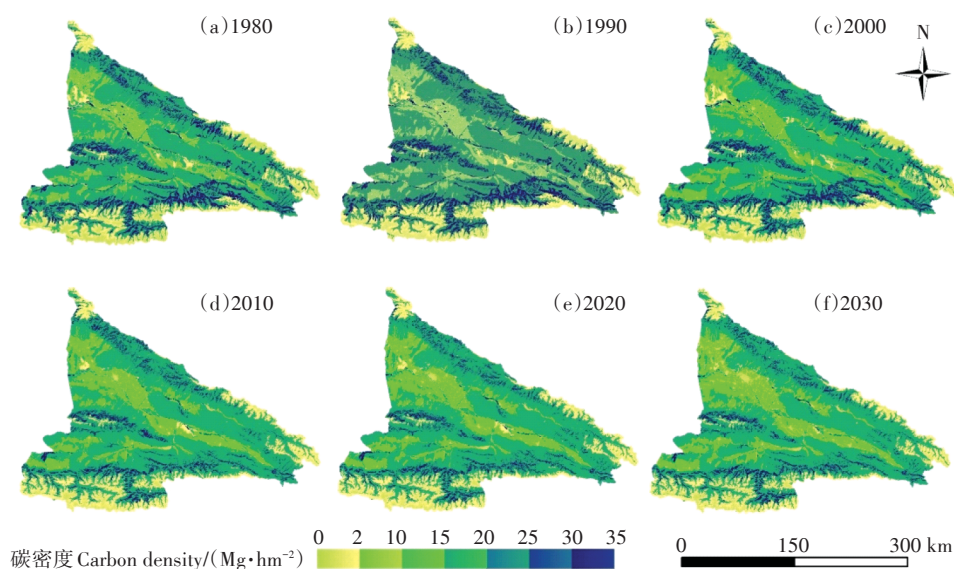


图6 伊犁谷地1980—2030年碳储量时空分布格局

Figure 6 Spatial and temporal distribution pattern of carbon reserves from 1980 to 2030 in the Yili Valley

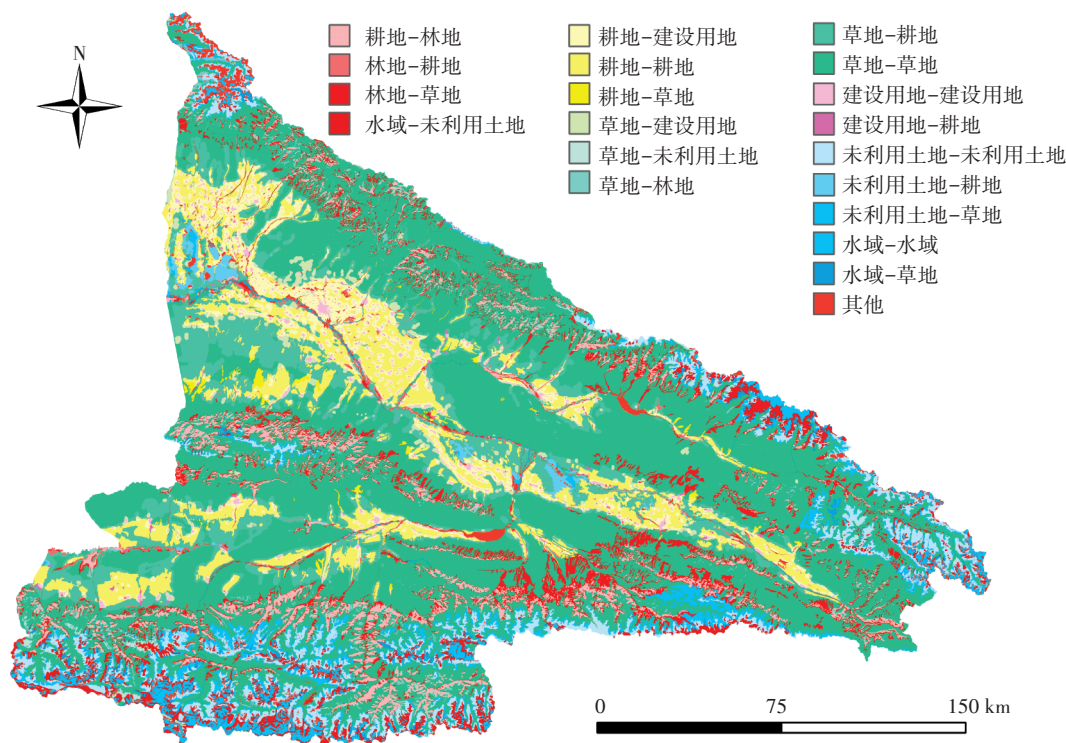


图7 伊犁谷地1980—2030年土地利用类型转移矩阵

Figure 7 Land use type transfer matrix from 1980 to 2030 in the Yili Valley

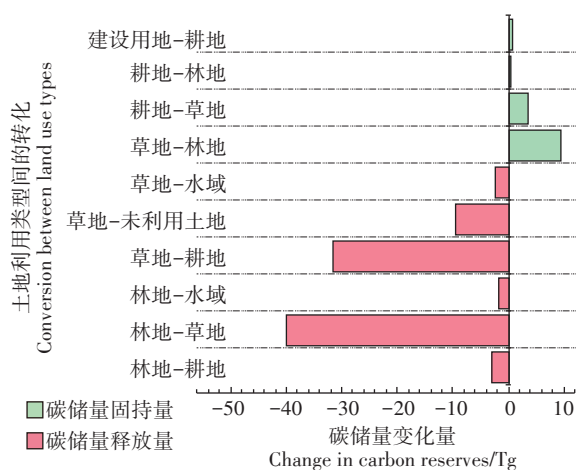


图8 伊犁谷地1980—2030年不同土地利用类型间转化的碳储量净固持/释放量

Figure 8 Sequestration/release of carbon stocks by land use type from 1980 to 2030 in the Yili Valley

与耕地的过程是碳的净释放过程^[29]。且林地面积快速地锐减,这可能是伊犁谷地总碳储量下降的主要原因。InVEST模型的估算过程需要输入合理的碳密度参数,朱文博等^[24]的研究发现耕地的地上生物量和土壤碳密度分别为 $4.02 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $105.14 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$,与本研究通过修正获得的耕地的地上生物量和土壤碳密度($5.44 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $128.83 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$)接近;ZHAO

等^[5]的研究发现灌木林地和未利用土地的碳密度分别为 $0.63 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $305.70 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$,与本研究得到的实测林地土壤碳密度和未利用土地碳密度($0.75 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $300.70 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$)一致。因此,本研究采用的基于土壤剖面实测的碳密度数据,与模型参数修正法获取的碳密度具有一定的可靠性和合理性,能够更加精准地估算区域碳固存动态特征。

本研究估算伊犁谷地碳储量平均值为 $1\ 085.81 \text{ Tg}$,预测1980—2030年50年期间潜在碳储量年均减少 1.31 Tg ,总碳储量累计净损失 65.94 Tg 。杨玉海等^[12]的研究发现通过计算伊犁谷地不同土壤类型分布面积与土壤碳储量,得出伊犁地区0~60 cm土壤有机碳储量总量为 925 Tg 。由于本研究不仅估算了土壤碳储量,还综合考虑并且预测了植被地上生物量碳储量与植被地下生物量的潜在碳储量,以及枯落物碳储量等陆地生态系统中的总碳储量,因此本研究结果高于其他研究估算的碳储量值。此外,柯新利等^[11]运用CA-Markov与InVEST模型分析了城市扩张和耕地保护的耦合政策对于碳储量的影响,发现城市扩张导致湖北省的碳储量累计减少 40.09 Tg 。此结论与本研究结果一致,表明城市建设用地与耕地扩张是加剧区域碳储量损失的主导因素之一。

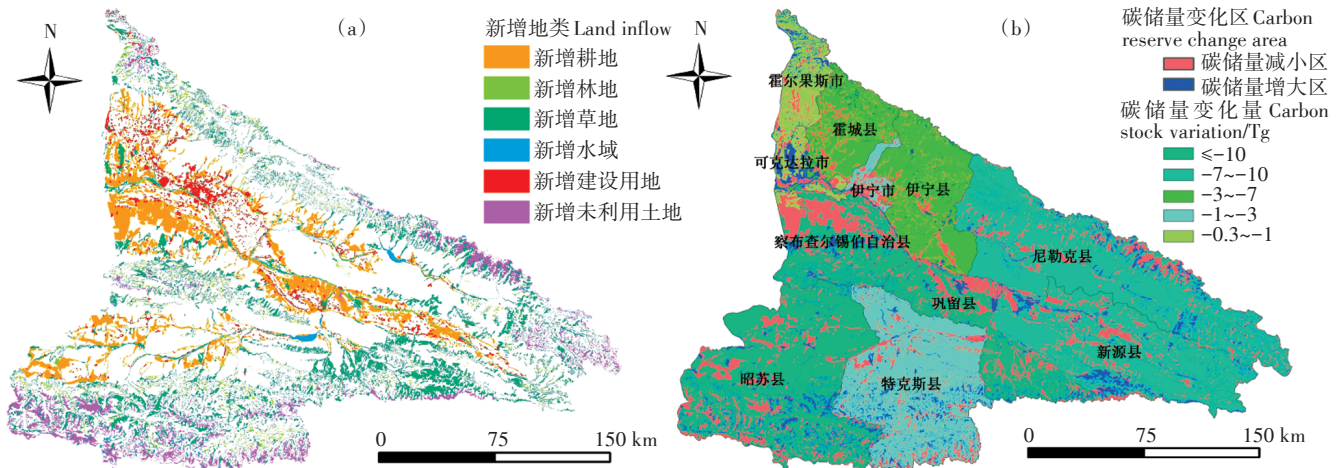


图9 伊犁谷地1980—2030年土地流入格局(a)及区域碳储量变化(b)

Figure 9 Land inflow pattern(a) and regional carbon reserve change(b) from 1980 to 2030 in the Yili Valley

本研究耦合 MCE-CA-Markov 与 InVEST 模型对伊犁谷地的碳储量进行估算和预测,定量评估区域土地利用规划和区域碳储量的数字化和可视化,为探讨土地利用变化下的碳储量提供了一种新思路。然而,针对 MCE-CA-Markov 模型预测时存在限制性因素不够全面等问题,在后续的研究中需要考虑某些特定情景之下的土地利用类型变化。这将进一步提高土地利用预测的准确度,进而有助于分析后续的碳储量的估算结果。此外,InVEST 模型在设置地上和地下生物量碳密度参数时,应结合更多实地采样的碳密度数据来设置模型参数,以更加精准地揭示研究区域的总碳储量动态变化特征。

4 结论

(1)伊犁谷地过去40年(1980—2020年)的LUCC呈现出建设用地和耕地持续扩张、林地与草地面积持续缩减等特征。利用MCE-CA-Markov模型预测2030年LUCC,结果表明耕地与建设用地将继续扩张,土地利用动态度大幅增加,土地利用可持续性降低。

(2)碳储量在空间上呈现一定的规律性,碳储量高值区域主要分布在南北山区林草地,其面积的快速缩减对伊犁谷地的陆地生态系统碳储量构成了严重威胁。预计到2030年伊犁谷地潜在碳储量仅为1 049.01 Tg,且碳储量的净固持量远小于净释放量。

(3)伊犁谷地平原耕作带周围耕地迅速扩张和高山林草地大幅退化是导致区域总碳储量下降的主要原因。

本研究采用 MCE-CA-Markov 耦合 InVEST 模型的方法,定量评估与预测了伊犁谷地1980—2030年

的陆地生态系统碳储量,可为区域土地利用规划及生态可持续发展提供决策依据。

参考文献:

- [1] LAL R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. *Science*, 2004, 304(5677): 1623-1627.
- [2] HOUGHTON R A, SKOLE D L. Annual fluxes of carbon from deforestation and regrowth in the Brazilian Amazon[J]. *Nature*, 2000, 403(6767): 301-304.
- [3] ZHANG M, HUANG X, CHUAI X, et al. Impact of land use type conversion on carbon storage in terrestrial ecosystems of China: A spatial-temporal perspective[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5(1): 10233.
- [4] LU R, MI L, ZHANG J, et al. Modeling the effects of urban expansion on regional carbon storage by coupling SLEUTH model and InVEST model[J]. *Ecological Research*, 2019, 34(3): 380-393.
- [5] 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*, 2018, 98: 29-38.
- [6] 刘晓娟, 黎夏, 梁迅, 等. 基于 FLUS-InVEST 模型的中国未来土地利用变化及其对碳储量影响的模拟[J]. *热带地理*, 2019, 39(3): 397-409. LIU X J, LI X, LIANG X, et al. Simulating the change of terrestrial carbon storage in China based on the FLUS-InVEST model [J]. *Tropical Geography*, 2019, 39(3): 397-409.
- [7] 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. LEI C J, LIU J X, YONG F, et al. Multi-scenario ecosystem service assessment of Wuma River Valley based on CLUE-S and InVEST models[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2017, 33(12): 1084-1093.
- [8] MOHAMED A, WORKU H. Simulating urban land use and cover dynamics using cellular automata and Markov chain approach in Addis Ababa and the surrounding[J]. *Urban Climate*, 2020, 31: 100545.
- [9] 张晓娟, 周启刚, 王兆林, 等. 基于 MCE-CA-Markov 的三峡库区土地利用演变模拟及预测[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(19): 268-277.

- ZHANG X J, ZHOU Q G, WANG Z L, et al. Simulation and prediction of land use change in Three Gorges Reservoir area based on MCE-CA-Markov[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(19):268-277.
- [10] LI B, CHEN Y, LI W, et al. Spatial and temporal variations of temperature and precipitation in the arid region of northwest China from 1960 to 2010[J]. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2013, 22(2):362-371.
- [11] 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.
- [12] 杨玉海, 陈亚宁, 李卫红, 等. 伊犁河谷不同植被带下土壤有机碳分布[J]. *地理学报*, 2010, 65(5):605-612.
- YANG Y H, CHEN Y N, LI W H, et al. Soil organic carbon distribution of different vegetation types in the Ili River valley[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(5):605-612.
- [13] 许小娟, 刘会玉, 林振山, 等. 基于CA-Markov模型的江苏沿海土地利用变化情景分析[J]. *水土保持研究*, 2017, 24(1):213-218, 225.
- XU X J, LIU H Y, LIN Z S, et al. Scenario analysis of land use change in Jiangsu coast based on CA-Markov model[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2017, 24(1):213-218, 225.
- [14] 朱超, 赵淑清, 周德成. 1997—2006年中国城市建成区有机碳储量的估算[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(5):1195-1202.
- ZHU C, ZHAO S Q, ZHOU D C. Organic carbon storage in urban built-up areas of China in 1997—2006[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(5):1195-1202.
- [15] 王鑫, 杨德刚, 熊黑钢, 等. 新疆不同植被类型土壤有机碳特征[J]. *干旱区研究*, 2017, 34(4):782-788.
- WANG X, YANG D G, XIONG H G, et al. Characteristics of soil organic carbon under different vegetation types in Xinjiang[J]. *Arid Zone Research*, 2017, 34(4):782-788.
- [16] 李克让, 王绍强, 曹明奎. 中国植被和土壤碳储量[J]. *中国科学(D辑)*, 2003, 33(1):72-80.
- LI K R, WANG S Q, CAO M K. Carbon storage of vegetation and soil in China[J]. *Science of China (Series D)*, 2003, 33(1):72-80.
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社, 2000.
- BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing:China Agricultural Press, 2000.
- [18] 徐艳, 张凤荣, 段增强, 等. 区域土壤有机碳密度及碳储量计算方法探讨[J]. *土壤通报*, 2005(6):22-25.
- XU Y, ZHANG F R, DUAN Z Q, et al. Calculation method for density and storage of soil organic carbon[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2005(6):22-25.
- [19] 陈飞, 周德全, 白晓永, 等. 典型喀斯特槽谷区石漠化时空演变及未来情景模拟[J]. *农业资源与环境学报*, 2018, 35(2):174-180.
- CHEN F, ZHOU D Q, BAI X Y, et al. Spatial-temporal evolution of Karst rocky desertification and future trends based on CA-Markov methods in typical Karst valley[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2018, 35(2):174-180.
- [20] LÓPEZ E, BOCCO G, MENDOZA M, et al. Predicting land-cover and land-use change in the urban fringe[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2001, 55(4):271-285.
- [21] 张云倩, 张晓祥, 陈振杰, 等. 基于InVEST模型的江苏海岸带生态系统碳储量时空变化研究[J]. *水土保持研究*, 2016, 23(3):100-111.
- ZHANG Y Q, ZHANG X X, CHEN Z J, et al. Research on the spatiotemporal variation of carbon storage in coastal zone ecosystem of Jiangsu based on InVEST model[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2016, 23(3):100-111.
- [22] ALAM S, STARR M, CLARK B. Tree biomass and soil organic carbon densities across the Sudanese woodland Savannah: A regional carbon sequestration study[J]. *Journal of Arid Environments*, 2013, 89(1):67-76.
- [23] 陈光水, 杨玉盛, 谢锦升, 等. 中国森林的地下碳分配[J]. *生态学报*, 2007, 27(12):5148-5157.
- CHEN G S, YANG Y S, XIE J S, et al. Total below ground carbon allocation in China's forests[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(12):5148-5157.
- [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[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.
- [25] SPAWN S A, GIBBS H K. Global aboveground and belowground biomass carbon density maps for the year 2010[DB/OL]. (2020-03-05) [2020-10-12]. https://daac.ornl.gov/cgi-bin/dsviewer.pl?ds_id=1763.
- [26] 耿冰瑾, 曹银贵, 苏锐清, 等. 京津冀潮白河区域土地利用变化对生态系统服务的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2020, 37(4):583-593.
- GENG B J, CAO Y G, SU R Q, et al. Influence of land-use change on ecosystem services in the Chaobai River region of Beijing-Tianjin-Hebei[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, 37(4):583-593.
- [27] 钟莉娜, 王军. 基于InVEST模型评估土地整治对生境质量的影响[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(1):250-255.
- ZHONG L N, WANG J. Evaluation on effect of land consolidation on habitat quality based on InVEST model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(1):250-255.
- [28] 朱增云, 阿里木江·卡斯木. 基于地理探测器的伊犁谷地生境质量时空演变及其影响因素[J]. *生态学杂志*, 2020, 39(10):3408-3420.
- ZHU Z Y, ALIMUJIANG K. Spatial-temporal evolution of habitat quality in Yili Valley based on geographical detector and its influencing factors[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, 39(10):3408-3420.
- [29] 田志会, 马晓燕, 刘瑞涵. 北京市农田生态系统碳足迹及碳生态效率的年度变化研究[J]. *农业资源与环境学报*, 2015, 32(6):603-612.
- TIAN Z H, MA X Y, LIU R H. Interannual variations of the carbon footprint and carbon eco-efficiency in agro-ecosystem of Beijing, China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2015, 32(6):603-612.