

基于 Markov-PLUS 和 InVEST 模型的锡林郭勒草原碳储量变化预测

刘涛¹, 刘晓龙^{2,3*}, 郭利彪^{2,3}, 高书鹏¹, 屈冉⁴

(1. 云南师范大学地理学部, 云南 昆明 650500; 2. 内蒙古工业大学信息工程学院, 内蒙古呼和浩特 010051; 3. 内蒙古自治区雷达技术与应用重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010051; 4. 生态环境部卫星环境应用中心, 北京 100094)

摘要:【目的】研究锡林郭勒草原土地利用对碳储量的影响, 了解草原生态系统固碳能力的变化趋势。【方法】基于 1995—2015 年土地利用变化规律, 结合场景分析法和 Markov-PLUS 复合模型, 模拟锡林郭勒草原历史趋势、经济发展和生态保护 3 个场景下 2035 年的土地利用空间分布, 并利用 InVEST 模型预测相应的碳储量, 分析土地利用变化对碳储量的影响。【结果】(1) 1995—2015 年, 锡林郭勒草原林地和城乡工矿居民用地面积持续增加, 草地面积减少, 但草地仍是占比最大的土地利用类型, 20 年间区域碳储量增加了 $18\,228.93 \times 10^3 \text{ t}$; (2) 预测到 2035 年, 历史趋势和经济发展场景下, 用地面积增加的主要为草地和城乡工矿居民用地, 生态保护场景下为林地和草地, 3 种场景下碳储量增量分别为 $4\,419.74 \times 10^3$ 、 $1\,1207.75 \times 10^3$ 和 $18\,498.45 \times 10^3 \text{ t}$ 。【结论】Markov-PLUS 和 InVEST 模型预测锡林郭勒草原未来土地利用和碳储量变化获得的结果可靠; 预测结果表明, 1995—2035 年锡林郭勒碳储量呈增加趋势, 生态保护场景下碳储量增幅显著高于其他场景; 林地、草地与其他地类之间的转变是导致碳储量变化的主要原因。本研究可以为该区域未来的土地利用结构的调整和管理提供参考。

关键词: 土地利用变化; 碳储量; Markov-PLUS 模型; InVEST 模型; 草原

中图分类号: S812.29 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-5500(2023)02-0001-12

DOI: 10.13817/j.cnki.cycp.2023.02.001



在全球气候变化背景下, 温室气体特别是 CO_2 总排放量上升引起了国际社会的广泛关注。为应对气候变化, 国家已把“做好碳达峰, 实现碳中和”作为当前重点任务之一^[1]。生态系统的固碳能力对降低大气中 CO_2 等温室气体浓度, 维持区域碳平衡具有重要作用, 是生态系统服务的重要功能之一^[2]。当前, 土地利

用变化已逐渐成为人类活动影响气候变化和生态系统的主要因素^[3]。土地利用变化通过改变陆地生态系统原有的土地覆盖格局、生态系统结构、过程和功能, 影响生态系统的物质循环和能量流动, 也导致了 CO_2 在植被和土壤中的固定或释放, 从而影响着区域碳循环和气候变化^[4]。草原作为中国面积最大的陆地生态系统类型, 是一个巨大的碳库, 其碳储量约占世界草原总碳储量的 10%, 在防风固沙、生物多样性保育和生态系统碳固持等方面发挥着重要作用^[5-6]。因此, 结合土地利用模型评估与预测草原生态系统碳储量时空变化, 对优化土地利用结构, 改善区域生态系统服务功能和维持全球碳平衡, 减缓全球气候变化具有重要意义。目前区域碳储量估算主要有 2 类方法: 1) 基于生物地球化学过程的模型 (例如 Biome-BGC、CENTURY 和 TECO-R 等) 进行量化; 2) 结合土地利

收稿日期: 2021-11-29; **修回日期:** 2022-04-20

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFB0501502); 内蒙古自治区人才开发基金 (PZ2021000658); 内蒙古自治区科技计划项目 (2019GG138); 内蒙古自治区自然科学基金面上项目 (2021LHMS04002)

作者简介: 刘涛 (1997-), 女, 广东梅州人, 硕士研究生。

E-mail: taojlr@outlook.com

*通信作者。E-mail: liuxl@mail.bnu.edu.cn

用和碳密度数据进行经验评估^[7-8]。由于与地表特征相关的实地参数的多样性和模型自身的复杂性,生物地球化学模型在评估区域碳储量时的准确性较低^[9]。基于碳密度的方法可以清晰反映土地利用与碳储量之间的关系。结合土地利用预测结果,还可以预测未来不同场景下的碳储量变化,为土地利用结构优化提供科学依据。现有研究表明,使用InVEST模型的碳储量模块和碳密度数据,可以对区域碳储量进行快速直观地估算并获得准确的结果,更适用于评估区域土地利用变化或政策调整对碳储量动态的影响^[10-11]。

近年来,基于模型模拟未来不同场景下的土地利用变化及其对碳储量的影响,以优化土地利用格局,实现低碳排放,逐渐成为热点^[10]。例如:Li等^[12]分析了综合空间调控下武汉的城市增长对碳储量的影响,认为综合空间管理可以缓解城市建设与环境保护之间的矛盾。Zhu等^[13]模拟了不同场景下土地利用变化对流域碳储量的空间分布的影响,结果表明生态保护场景可以增强固碳能力。元胞自动机(Cellular Automata, CA)因以简单灵活的方式模拟土地利用的时空变化,成为目前许多土地利用模拟模型的基础。混合CA模型可通过整合影响土地利用的区域环境因素和人类活动因素,生成具有复杂转换规则的土地利用空间模拟数据,已广泛用于研究中^[14-15]。然而,目前较为流行的用于未来土地利用场景规划的土地利用模拟模型,包括CA-Markov、CLUE-s和FLUS等均存在局限^[16-17],这些模型在预测土地利用变化的时候,一方面不能充分考虑土地利用驱动因素对土地利用变化的影响^[18],另一方面,不能很好地实现对自然地类的模拟^[19],而Liang等^[20]提出斑块生成土地利用变化模拟模型(patch-generating land use simulation, PLUS),解决了当前混合CA模型面临的问题,可以准确模拟自然地类斑块生长过程,更适合用于模拟以草地为主的草原生态系统未来的土地利用,可为分析碳储量变化提供可靠的土地利用数据。

锡林郭勒盟境内的锡林郭勒草原,是中国4大草原之一,草原总面积占全盟总面积的97.8%,可放牧草地面积占草地总面积的92%^[21],生态系统中的草地类型主要有典型草原、草甸草原和荒漠草原。近年来,“京津风沙源治理工程”“退牧还草工程”等生态工

程的实施,在改变区域土地利用格局的同时,一定程度上促进了草原生态系统的恢复和生产力的提升,然而这些干预对草原生态系统碳储量和碳汇潜力的影响还需进一步研究^[22]。

锡林郭勒草原是华北地区的生态屏障,其土地利用格局直接关系到区域生态系统的固碳能力与生态平衡,影响锡林郭勒草原的可持续发展。基于此,本研究利用锡林郭勒盟1995—2015年的土地利用空间数据,基于Markov-PLUS复合模型,模拟预测该地区2035年的土地利用空间分布,结合InVEST模型和碳密度数据进行当前和未来碳储量估算,分析当前和未来土地利用对碳储量的影响,为锡林郭勒草原的生态环境保护 and 可持续发展提供理论依据,也可以为锡林郭勒草原今后的土地利用调整提供理论参考。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

锡林郭勒盟位于内蒙古自治区中部,地理位置N 41°35′~46°47′,E 116°5′~120°01′,地势南高北低,自西南向东北倾斜,地貌以高原为主,中部分布着浑善达克沙地,属温带大陆性气候,年平均气温0~3℃,降水集中于夏秋两季,生态环境较为脆弱(图1)。

1.2 数据来源与处理

土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn>)的中国多时期土地利用/土地覆被遥感监测数据集(CNLUCC)^[23]。该数据集将土地利用一级类型分为耕地、林地、草地、水域、城乡工矿居民用地和未利用土地6类,以美国陆地卫星Landsat遥感影像数据为主要数据源,通过人工目视解译生产的土地利用数据分类精度达到94.3%以上^[24-26],空间分辨率为30 m。通过裁剪后得到锡林郭勒盟1995,2000,2005,2010和2015年5期土地利用数据。

土地利用模拟需要输入土地利用驱动因子数据(图2),其中自然环境因素包括年平均气温、年降水量、DEM、坡度、坡向和到河流的距离,社会经济因素包括到城镇居民点、公路和铁路的距离、人口分布和GDP分布。气温和降水数据来自国家地球系统科学数据中心(<https://www.geodata.cn>)的中国1 km分

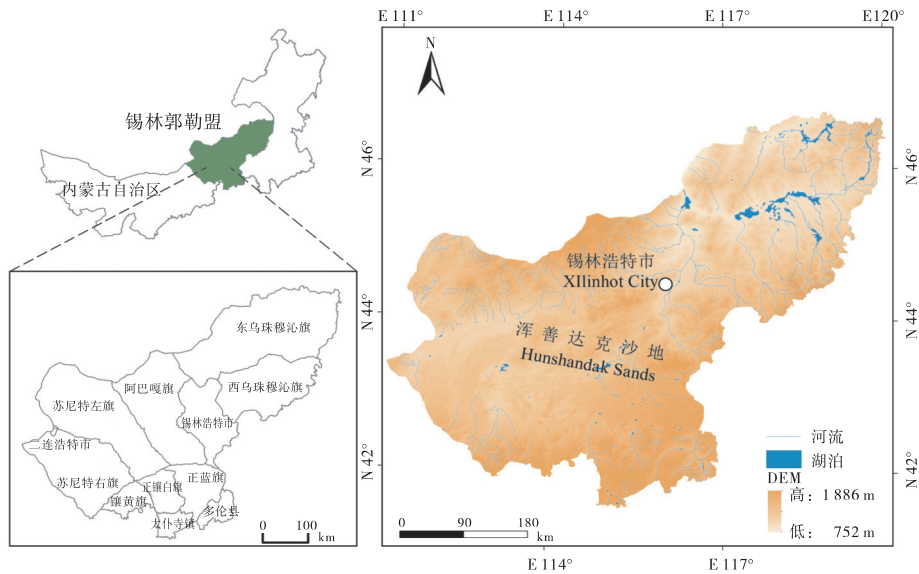


图 1 研究区地理位置

Fig. 1 The location of study area

分辨率逐月平均气温数据集和逐月降水量数据集,通过计算年平均气温和年降水量得到年度数据;数字高程模型 (DEM) 来自美国 USGS LP DAAC 网站 (<https://lpdaac.usgs.gov>) 的 ASTER GDEM V3 数据,空间分辨率为 30 m,并在 ArcGIS 软件中,基于 DEM 数据计算坡度和坡向;人口分布和 GDP 分布数据来自中国科学院资源与环境科学数据中心,空间分

辨率为 1 km^[27-28];河流、城镇居民点、道路网和行政区划来自国家基础地理信息中心全国地理信息资源目录服务系统 (<https://www.webmap.cn>) 的 1:100 万全国基础地理数据库,通过 ArcGIS 中的距离分析得到河流、居民点、道路的距离数据。为了与土地利用数据相匹配,所有数据均采用最邻近法重采样至 30 m 的空间分辨率。

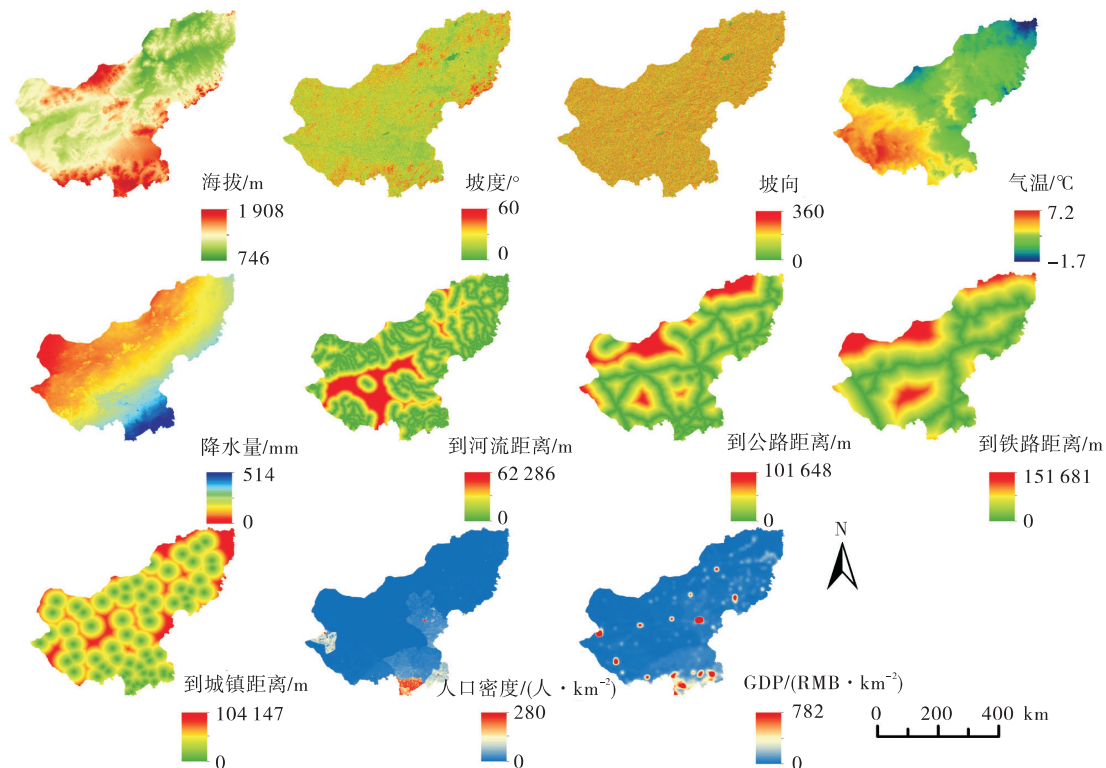


图 2 土地利用驱动因素

Fig. 2 Land use drivers

1.3 基于Markov-PLUS复合模型的土地利用模拟

1.3.1 Markov-PLUS 复合模型的原理 Markov-PLUS 复合模型把 Markov 和 PLUS 模型结合起来,用于模拟锡林郭勒草原不同场景下的土地利用变化。结合现有的土地利用数据,Markov 模型用于预测不同场景下未来各类土地的数量需求,PLUS 模型用于模拟未来土地利用的空间格局,该复合模型在 PLUS 1.3.0 软件下实现。Markov 模型以马尔可夫随机过程为理论基础,通过求出前后两期的土地利用转移概率矩阵来模拟土地利用随时间变化,以此为基础预测后续变化^[29-30]。本研究通过考虑不同场景下的土地利用转换差异,在 Markov 模型计算中加入各场景对应的土地利用的转换强度系数,来预测土地需求,调整后的 Markov 模型表达如下:

$$S_{t+1} = P_{ij} \times I_n \times S_t \quad (1)$$

$$P_{ij} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{n1} & P_{n2} & \dots & P_{nn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

且:

$$\sum_{j=1}^n P_{ij} = 1 (i, j = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

公式(1)~(3)中: S_t, S_{t+1} 分别为 $t, t+1$ 时间的土地利用状态; P_{ij} 为某状态转移矩阵; n 为土地利用类型; $I_n = (i_1, i_2, \dots, i_n)$,其中 i 为土地利用转换强度系数,参考Liang等^[31]的研究确定,如表1所示。当 $i > 1$ 时,表示该类土地利用转移存在加速趋势;当 $0 < i < 1$ 时,表示转移中存在减缓趋势;当 $i = 1$ 时,表示转移速率保持不变。土地利用场景设计见1.3.2节。

表1 土地利用转换强度系数

Table 1 Transfer weight coefficient of land use in three scenarios

	耕地	林地	草地	水域	城乡工矿居民用地	未利用土地
历史趋势场景	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
经济发展场景	0.95	1.20	1.20	1.00	1.00	1.00
生态保护场景	1.10	0.90	0.90	1.00	1.00	1.00

但 Markov 模型只能提供未来土地利用数量需求预测,无法对土地利用空间变化进行模拟,而 PLUS 模型可以实现对土地利用详细复杂过程的模拟。PLUS 基于多类型随机种子和递减阈值,通过结合起始时间的土地利用数据、用地发展概率、土地数量需求和地类转换限制,构建 CA 模型,实现土地利用的模拟^[20],其 CA 模型可表达为:

$$S(t+1) = f[S(t), P, \Omega, D, T] \quad (4)$$

式中: S 代表该像素的土地利用类型(元胞的状态), t 为迭代次数; P 为土地利用发展概率; Ω 为元胞邻域效应; D 为惯性系数,反映了未来土地数量需求的影响,通过各类土地利用的模拟数量与其未来需求的差异动态调整; T 为地类转换限制,反映两类土地利用是否可以发生转换,可转移为1,否则为0,不同场景下转换限制不同^[20]。

1.3.2 土地利用场景设计 未来的土地利用变化可能存在不同的场景,本研究采用场景分析法,结合锡林郭勒草原在过去不同时期由于生态工程实施、经济

发展等影响下的土地转移趋势和未来管控方向,以及各场景模式的特点^[18,22,31],设置了历史趋势(HT)场景、经济发展(ED)场景和生态保护(EP)场景。各场景设置如下:

(1)历史趋势场景(HT):假设过去的土地利用转变模式是持续的,并且未来的土地需求是对当前的延续。根据2010—2015年土地利用转移概率矩阵以及该场景下的转换强度系数,使用 Markov 模型预测未来的土地利用需求。

(2)经济发展场景(ED):反映近年来推进新型城镇化背景下兼顾城镇开发和生态保护的土地利用变化趋势。根据2010—2015年土地利用转移概率矩阵以及该场景下的转换强度系数,使用 Markov 模型预测未来的土地利用需求。

(3)生态保护场景(EP):该场景加强森林和草原保护,严格控制耕地和建设用地的增长,实施退耕还林还草等生态保护工程。2000年以来,国家和自治区将锡林郭勒盟列入生态治理的重点地区。在2000—

2005 年期间相继实施了京津冀风沙源治理、生态移民、退耕还林等生态保护工程,注重进行森林和草原保护,这一时期的土地利用转移可以代表生态保护场景下的土地利用变化趋势。根据 2000—2005 年的土地利用转移概率矩阵以及该场景下的转换强度系数,使用 Markov 模型预测未来土地需求。

1.3.3 Markov-PLUS 复合模型的实现过程 (1)提取土地利用扩张:在 PLUS 软件中,结合前后两期土地利用数据提取土地利用扩张数据,其中历史趋势和经济发展场景输入的两期土地利用数据均为 2010 和 2015 年,生态保护场景输入的两期土地利用数据为 2000 和 2005 年。

(2)计算不同场景下的土地利用发展概率:在 PLUS 软件的 LEAS 模块中,输入提取好的土地利用扩张数据和土地利用驱动因素数据,计算得到各类用地的的发展概率图像。

(3)土地需求预测:根据 2015 年的土地利用数据,以 5 年为步长,基于 Markov 模型计算 3 种场景下 2035 年的土地利用数量需求。

(4)土地利用空间模拟:利用 PLUS 软件的 CARS 模块,通过输入 2015 年的土地利用空间数据,以及 3 种场景下的土地利用数量需求和地类转换限制,设置邻域为 3×3 窗口,模拟得到 3 种场景下 2035 年的土地利用空间数据。

(5)土地利用模拟精度验证:为了验证 PLUS 模型对研究区土地利用模拟的可靠性,以 2000 年作为预测

起始时期,利用 PLUS 模型,通过输入 2000 年的土地利用数据,模拟研究区 2005 年的土地利用数据,选择 kappa 系数和总体精度作为指标评价模拟精度。利用 2005 年的实际土地利用数据对模拟结果进行精度验证,总体精度为 92%,kappa 系数为 0.93,表明模拟效果较好,PLUS 模型适用于锡林郭勒草原未来土地利用空间模拟。

1.4 碳储量的估算

InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs)即“生态系统服务功能与权衡交易综合评价模型”,可用于量化多种生态系统服务功能。InVEST 模型中的碳储量计算模块基于碳密度方法建立,包括 4 个碳库的碳密度,即地上生物碳、地下生物碳、土壤有机碳和死亡有机质碳。通过输入特定时期的土地利用图和每种土地利用类型对应的 4 个碳库碳密度数据,可以得到特定时期的碳储量分布图,可用于估计土地利用随时间变化对碳储量的影响^[32-33]。InVEST 模型碳储量计算公式为:

$$C = \sum_{m=1}^n A_m \times (C_{m,a} + C_{m,b} + C_{m,c} + C_{m,d}) \quad (6)$$

式中, C 为研究区总碳储量, A_m 是地类 m 的面积 (hm^2), C_m 是地类 m 对应的 4 个碳库的碳密度值,分别是地上碳密度 ($C_{m,a}$, t/hm^2),地下碳密度 ($C_{m,b}$, t/hm^2),土壤碳密度 ($C_{m,c}$, t/hm^2)和死亡有机质碳密度 ($C_{m,d}$, t/hm^2)。本研究使用的碳密度数据为研究区各地类实测数据,并参考张文华等^[6]的研究获得,碳密度如表 2 所示。

表 2 各类土地利用的碳密度
Table 2 Carbon destiny of different land use

土地利用类型	地上碳密度	地下碳密度	土壤碳密度	死亡有机质碳密度
耕地	30.00	25.00	28.00	0.00
林地	140.00	70.00	65.00	13.25
草地	15.00	35.00	30.00	1.00
水域	10.00	4.00	5.00	0.00
城乡工矿居民用地	5.00	5.00	15.00	0.00
未利用土地	2.00	1.00	2.00	2.60

2 结果与分析

2.1 1995—2015 年的土地利用变化

1995—2015 年,草地是锡林郭勒草原面积最大的

土地利用类型,占总面积的 80% 以上;其次为未利用土地,占比在 9% 以上;耕地、水域和城乡工矿居民用地面积较小,占比均在 5% 以下(表 3)。1995—2015 年,各地类面积都发生了不同程度的变化,林地和城

乡工矿居民用地为变化幅度最大的地类。其中林地面积呈先快后慢的增加趋势,增加了1 673 km²,城乡工矿居民用地面积持续增加,增量为880.89 km²。水域也有较大幅度增加,增加了384.38 km²,未利用土地和耕地呈波动增加趋势,变化幅度较小;相比1995年,草地面积呈减少趋势,1995—2000年减少量最大,达4 991.41 km²。2000年后,由于京津冀风沙源治理工程等生态保护工程的实施,草地面积得到恢复,2015年比2000年增加了694.63 km²。

表3 1995–2015年锡林郭勒草原各期不同土地利用类型的面积变化
Table 3 Land use areas in each period from 2005 to 2015 in Xilingol grassland km²

土地利用类型	1995年	2000年	2005年	2010年	2015年	1995—2015年变量
耕地	5 477.62	5 769.53	5 785.16	5 808.69	5 577.38	99.76
林地	1 392.70	2 753.14	2 803.49	3 080.19	3 065.70	1 673.00
草地	172 706.01	167 714.60	166 572.94	168 104.52	168 409.23	—4 296.78
水域	1 155.55	1 891.58	1 399.89	1 242.89	1 539.93	384.38
城乡工矿居民用地	453.96	481.29	537.90	784.37	1 334.85	880.89
未利用土地	18 673.35	21 249.13	22 759.93	20 838.52	20 052.30	1 378.95

2.2 不同场景土地利用模拟结果

根据 Markov-PLUS 复合模型的 2035 年锡林郭勒草原土地利用模拟结果表明,研究区面积占比最大的土地利用类型是草地,其次是耕地和林地,而水域、城乡空间居民用地和未利用土地面积较小(表4)。不同场景下的模拟结果在土地利用构成上存在差异,具体而言,到2035年,历史趋势场景下,研究区内耕地和未利用土地

将比2015年分别减少859.01和919.15 km²。林地、草地、水域和城乡工矿居民用地将持续增加,增量最大的是草地、水域和城乡工矿居民用地,分别为760.90、520.66和350.19 km²。从转移方向看,减少的耕地主要转为草地;增加的林地主要来自耕地和草地,草地主要来自未利用土地、林地和耕地,水域来自未利用土地,城乡工矿居民用地主要来自耕地和未利用土地。

表4 2015年与2035年3种场景下模拟结果的土地利用面积
Table 4 Land use areas of 2015 and 2035 simulation results under three scenarios

土地利用类型	2015		2035((HT)		2035(ED)		2035(EP)	
	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%
耕地	5 577.38	2.79	4 718.38	2.36	5 172.87	2.59	5 321.92	2.66
林地	3 065.70	1.53	3 212.10	1.61	3 128.02	1.56	3 646.98	1.82
草地	168 409.23	84.21	169 170.14	84.59	169 577.81	84.80	168 920.32	84.47
水域	1 539.93	0.77	2 060.59	1.03	1 539.93	0.77	1 363.35	0.68
城乡工矿居民用地	1 334.85	0.67	1 685.03	0.84	3 594.38	1.80	1 657.32	0.83
未利用土地	20 052.30	10.03	19 133.15	9.57	16 966.40	8.48	19 069.52	9.54

注:HT 历史趋势场景;ED 经济发展场景;EP 生态保护场景

经济发展场景下,与2015年相比减少的地类为耕地和未利用土地,分别减少了404.51和3 085.90 km²。面积将持续增加的为草地、城乡工矿居民用地,增量分别为1 168.57和2 259.53 km²。草地和城乡工矿居民用地的增加表明,在经济发展场景下,在促进城镇化发展的同时,也保证了畜牧业的发展。从转移方向看,主要发生了耕地和未利用土地向草地和城乡工矿居民用地的转移。

生态保护场景下,与2015年相比,面积将减少的地类为耕地、水域和未利用土地,减量最大的是未利用土地,达982.78 km²。减少的未利用土地转为草地。林地、草地和城乡工矿居民用地将会增加,增量较大的是林地和草地,分别为581.27和511.08 km²。增加的林地主要来自草地和未利用土地,增加的草地主要来自耕地和未利用土地。

整体而言,3种场景的模拟与2015年相比在空间

分布上较为一致,耕地集中分布在研究区南部的多伦县和太仆寺旗,东北部的东乌珠穆沁旗也有少量分布;林地多分布于东部的西乌珠穆沁旗;而草地广泛

分布于研究区各旗县;水域、城乡工矿居民用地和未利用土地呈现零散分布(图 3)。

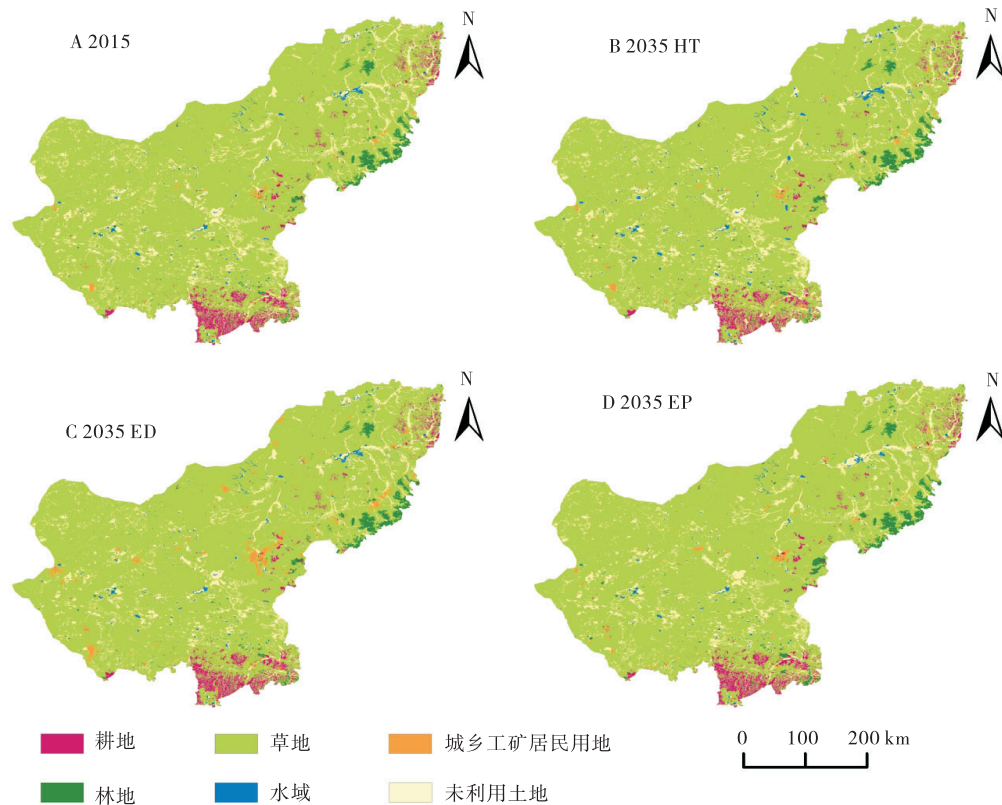


图 3 2015 年与 2035 年 3 种场景下模拟的土地利用空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of land uses of 2015 and 2035 simulation results under three scenarios

注:HT 历史趋势场景;ED 经济发展场景;EP 生态保护场景

2.3 不同场景下 1995—2035 年碳储量变化特征

1995—2015 年,锡林郭勒草原总碳储量增加了 $18\,228.93 \times 10^3$ t,增幅为 1.21%,年平均增加 911.45×10^3 t(表 5)。总碳储量增加的贡献主要来自地上生物量碳库。到 2030 年,历史趋势、经济发展和生态保护场景下预测的总碳储量分别为 $1\,524.7 \times 10^6$ 、 $1\,531.49 \times 10^6$ 和 $1\,538.78 \times 10^6$ t,相较 2015 年三者均有不同程度的增加,增量分别为 $4\,419.74 \times 10^3$ 、 $11\,207.75 \times 10^3$ 和 $18\,498.45 \times 10^3$ t,平均每年分别增加 221×10^3 、 560.39×10^3 和 924.92×10^3 t。2 种场景下增加的碳储量均来自地下生物量碳库和土壤碳库。生态保护场景相比历史趋势场景和经济发展具有更大的增幅,说明继续实施生态保护工程可以显著增强锡林郭勒草原的固碳作用。

1995—2015 年,锡林郭勒草原碳储量表现出较为一致的空间分布格局(图 4)。碳储量较高的区域分布

在西乌珠穆沁旗、东乌珠穆沁旗和多伦县。其中西乌珠穆沁旗的平均碳储量最高,且 1995—2015 年高值区域增加明显;碳储量低值区域主要分布在苏尼特左旗、正镶白旗和大仆寺旗。这种空间分布格局与该区域气候特征、植被分布状况和生态保护工程的实施有关,东部和东南部地处大兴安岭山区,属于研究区重点保护的林区,且具备较好的水热条件,碳储量较高;西部地处浑善达克沙地,气候较为干旱,以低覆盖度草地为主,碳储量较低。2035 年 3 种场景下预测的碳储量空间分布与 1995—2015 年的分布相似,生态保护场景下研究区东部的碳储量高值区呈现增加趋势。

2.4 土地利用类型转换导致的碳储量变化特征

由于不同土地利用类型间土地转移面积、各个碳库碳密度存在差异,不同土地利用类型间的转换对碳储量的影响不同(图 5)。1995—2015 年,锡林郭勒草原由于不同土地利用类型之间的转换导致碳储量增

表 5 1995–2035 年不同碳库和土地利用的碳储量

Table 5 Changes in carbon storage of different carbon pools and land uses from 1995 to 2035 ×10³ t

	1995	2015	2035		
			HT	ED	EP
地上碳储量	300 106.88	318 483.64	319 609.51	320 407.95	326 409.82
地下碳储量	630 470.53	628 124.31	629 956.20	632 460.41	633 335.70
土壤碳储量	547 501.31	547 554.12	548 985.00	553 104.37	552 349.23
死亡有机质碳储量	23 971.00	26 116.58	26 147.67	25 513.67	26 682.35
耕地	45 464.27	46 292.25	39 162.51	42 934.78	44 171.92
林地	40 144.57	88 368.87	92 588.86	90 165.10	105 124.12
草地	1 398 918.71	1 364 114.79	1 370 278.11	1 373 580.24	136 8254.57
水域	2 195.54	2 925.87	3 915.13	2 925.87	2 590.36
城乡工矿居民用地	1 134.90	3 337.11	4 212.58	8 985.94	4 143.29
未利用土地	14 191.74	15 239.75	14 541.20	12 894.46	14 492.83

注:HT,历史趋势场景;ED,经济发展场景;EP,生态保护场景

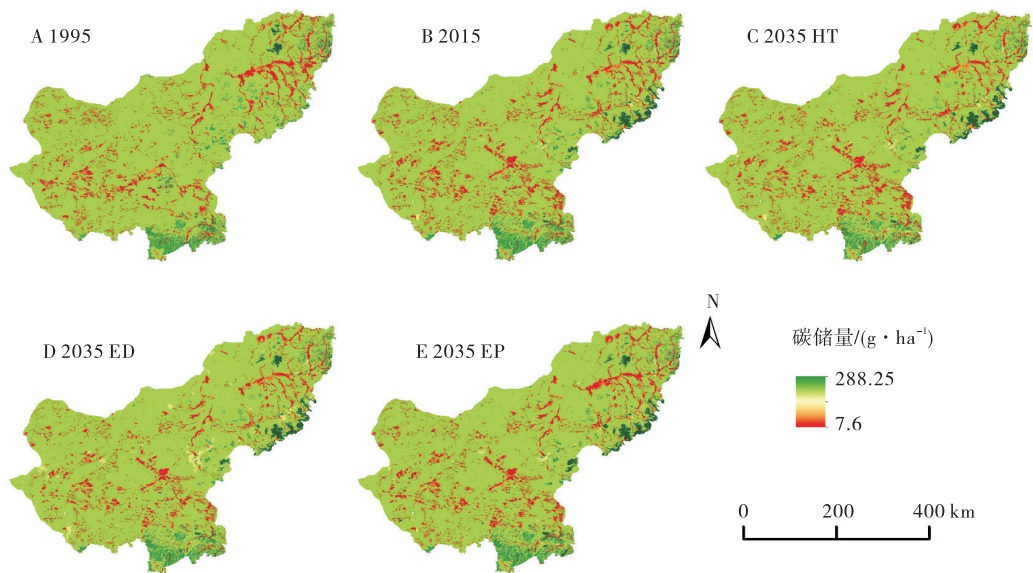


图 4 1995 年、2015 年和 2035 年三种场景下的碳储量空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of carbon storage of 1995, 2015 and 2035 under three scenarios

注:HT,历史趋势场景;ED,经济发展场景;EP,生态保护场景

加了 $18\,228.93\times10^3$ t,结合图 4 可知,碳储量的增加主要是因为大面积的未利用土地转为碳密度较高的林地和草地,草地转为碳密度较高的林地,虽然部分林地和草地的转出导致碳储量减少,但林地和草地面积增加带来的碳储量增加量大于减少量,因此整体而言形成了碳汇,带来区域碳储量增加。

2015—2035 年,3 种场景下碳储量均有所增加,但导致碳储量增加的土地利用转换机制有所差异。历史趋势场景下碳储量将增加 4419.74×10^3 t,增长幅度较小,这主要是因为未利用土地转为草地,草地转

为林地带来碳储量显著增加的同时,也受到林地和草地转为未利用土地造成的碳储量大量减少的影响;经济发展场景下,由于未利用土地向草地,草地向林地的转移,导致碳储量将增加 $11\,207.75\times10^3$ t;生态保护场景下碳储量将增加 18498.45×10^3 t,主要是由城乡工矿居民用地和未利用土地转为草地,耕地、草地和未利用土地转为林地带来的碳储量增加。生态保护场景下,碳储量增加显著高于经济发展场景:1) 由于生态保护场景下继续实施生态保护工程,注重林草地保护,促进其他地类向这两类生态用地转化,同时

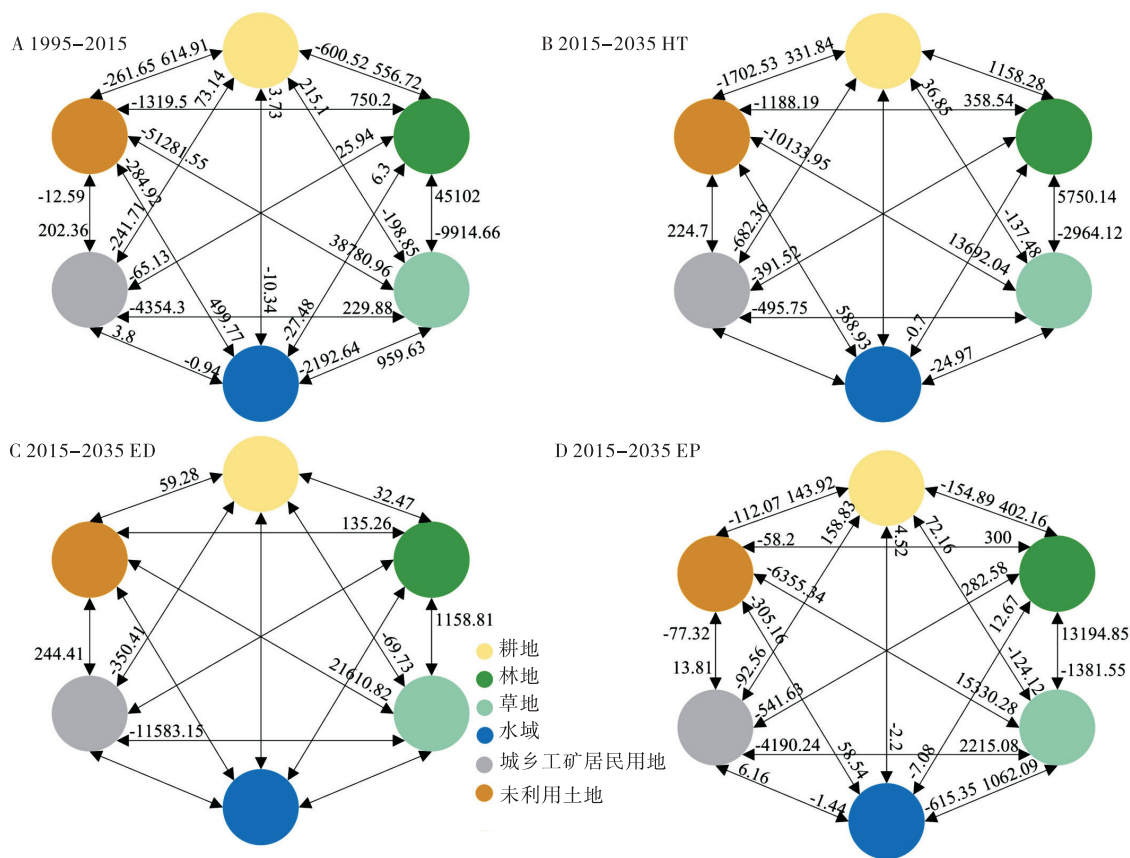


图5 1995–2015年,2015–2035年三种场景下的土地利用类型转换引起的碳储量变化

Fig. 5 Change of carbon storage caused by land use type conversion of 1995–2015 and 2015–2035 under three scenarios/ $\times 10^3 t$

注:HT,历史趋势场景;ED,经济发展场景;EP,生态保护场景

严格管控城乡工矿居民用地增长,导致碳储量增加;
2)经济发展场景下,大量草地和部分耕地转为城乡工矿居民用地,造成了较大的碳储量减少。

3 讨论

本研究结合土地利用模拟模型和InVEST模型,实现了锡林郭勒草原碳储量的预测。首先,在土地利用模拟方面,利用现有的土地利用数据,结合Markov-PLUS复合模型,预测了锡林郭勒草原未来的土地利用变化情况,总体精度高于90%,kappa系数高于0.9,要高于Wang等^[33]基于CA-Markov模型对锡林郭勒草原土地利用的模拟精度(kappa系数为0.7~0.8,总体精度在80%~85%)。此外,为了比较PLUS模型在模拟自然地类变化方面的优势,与FLUS模型进行了比较。结果表明,本研究使用的PLUS模型对林地和草地等自然地类的模拟结果要优于PLUS模型,更适合于自然地类为主的草原地区的

土地利用模拟。

在碳储量预测方面,基于模拟得到的土地利用数据,结合InVEST模型中的碳固存模块,本研究实现了对锡林郭勒草原当前和未来碳储量的估算和变化分析,并与其他学者的研究进行了比较。当前,利用InVEST模型对锡林郭勒草原进行碳储量的研究较少,张文华等^[6]的研究结果表明,InVEST模型适用于锡林郭勒草原区域的碳储量研究。此外,蒋欣阳^[34]基于2000年和2010年锡林郭勒草原土地利用数据对碳储量进行了估算,结果表明2000—2010年碳储量呈增加趋势,其结果与本研究获得的2000—2010年碳储量空间分布情况大体一致,且2000—2010年碳储量也呈增加趋势。

本研究实现了对锡林郭勒草原的碳储量预测,但必须指出研究结果也受到一些不确定因素的影响。1)InVEST模型中碳储量估算只考虑了不同地类的碳密度,碳储量变化就是由土地利用类型转化而引起的

变化,而未考虑土地利用内部植被种类、植被生长情况、土壤微生物活动等因素,以及它们的空间异质性对碳密度和碳储量的影响;2)土地利用数据基于遥感影像目视解译生产得到,虽然具有很高的分类精度,但在影像解译过程中,受操作人员主观因素的影响,不可避免地存在解译错误和多时相影像间不一致的情况,这些误差会在模型模拟中进行传递。因此,在以后的研究中还需要加强以下方面的工作:1)应该加强对碳密度的实地连续监测,充分考虑其年际变化,同时应该加强与同一区域其他实测结果的交叉验证以提高数据的一致性;2)考虑到土地利用内部的碳密度空间差异,使用InVEST模型估算时需要由实测结果进行修正,或者对估算模型加以改进;3)生产时间一致性和连续性更好的高分辨率土地利用数据应作为基础数据集,以实现大范围碳储量的连续监测,获得更为确定的碳储量变化趋势,为草原生态系统服务功能和应对气候变化等研究提供科学参考。

4 结论

利用Markov-PLUS复合模型和InVEST模型,在明确1995—2015年土地利用和碳储量变化的基础上,结合场景分析法,模拟预测了研究区在3种场景下2035年的土地利用和碳储量变化,并分析了土地利用变化对碳储量的影响,得出以下主要结论:

(1)1995—2015年,锡林郭勒草原土地利用发生了较为明显的变化,具体表现为林地和城乡工矿居民用地面积的持续增加,草地面积的减少,但草地并不是占比最大的土地利用类型。主要转移特征为耕地、草地和未利用土地向林地的转移,草地和未利用土地向城乡工矿居民用地的转移,是区域城镇化过程和京津风沙源治理、退耕还林等生态工程实施在土地利用上的反映。1995—2015年,锡林郭勒草原的碳储量呈增加趋势,共增加 $18\,228.93\times 10^3\text{ t}$ 。

(2)到2035年,历史趋势场景和经济发展场景下,锡林郭勒草原草地和城乡工矿居民用地的面积均有较大增加,而耕地和未利用土地均比2015年减少;历史趋势场景下主要发生了耕地和未利用土地向草地和城乡工矿居民用地,以及耕地向未利用土地的转移;经济发展场景下主要是耕地和未利用土地向草地,草地和未利用土地向城乡工矿居民用地的转移。

生态保护场景下增加的地类为林地和草地,减少的地类为耕地和未利用土地,主要发生耕地和未利用土地向林草地转移。

(3)历史趋势、经济发展和生态保护3个场景下,2035年的碳储量较2015年均有所增加,增量分别为 $4\,419.74\times 10^3$ 、 $11\,207.75\times 10^3$ 和 $18\,498.45\times 10^3\text{ t}$,生态保护场景碳储量增幅要显著大于其他场景。土地利用转变导致的碳储量变化的分析表明,实施生态保护可以促进高碳密度土地覆被类型的发展,增加区域碳储量。未来的土地开发管理中,加强保护森林和草原等生态用地,合理管控建设用地的扩张,可以更好地实现锡林郭勒草原的固碳作用。

参考文献:

- [1] 李若玮,叶冲冲,王毅,等. 基于InVEST模型的青藏高原碳储量估算及其驱动力分析[J]. 草地学报, 2021, 29(S1):43—51.
- [2] Ma A, He N, Yu G, *et al.* Carbon storage in Chinese grassland ecosystems: Influence of different integrative methods [J]. Scientific reports, 2016, 6(1): 1—10.
- [3] Gaillard M J, Morrison K D, Madella M, *et al.* Past land—use and land—cover change: The challenge of quantification at the subcontinental to global scales [J]. Past Global Changes Magazine, 2018, 26(1):3.
- [4] Zhu G, Qiu D, Zhang Z, *et al.* Land—use changes lead to a decrease in carbon storage in arid region, China [J]. Ecological Indicators, 2021, 127:107770.
- [5] 白永飞,陈世苹. 中国草地生态系统固碳现状、速率和潜力研究[J]. 植物生态学报, 2018, 42(3):261—264
- [6] 张文华,贾志斌,卓义,等. InVEST模型对锡林郭勒草原碳储量研究的适用性分析[J]. 地球环境学报, 2016, 7(1):87—96.
- [7] Lyu X, Li X, Dou H, *et al.* Evaluation of grassland carbon pool based on TECO—R model and climate—driving function: A case study in the Xilingol typical steppe region of Inner Mongolia, China [J]. Ecological Indicators, 2020, 117:106508.
- [8] Quesada B, Arneeth A, Robertson E, *et al.* Potential strong contribution of future anthropogenic land—use and land—cover change to the terrestrial carbon cycle [J]. Environmental Research Letters, 2018, 13(6):064023.
- [9] Prestele R, Alexander P, Rounsevell M D A, *et al.* Hot-spots of uncertainty in land-use and land-cover change pro-

- jections: a global - scale model comparison [J]. *Global change biology*, 2016, 22(12): 3967—3983.
- [10] Liang Y, Liu L, Huang J. Integrating the SD-CLUE-S and InVEST models into assessment of oasis carbon storage in northwestern China [J]. *Plo Sone*, 2017, 12(2): e0172494.
- [11] Posner S, Verutes G, Koh I, *et al.* Global use of ecosystem service models [J]. *Ecosystem Services*, 2016, 17: 131—141.
- [12] Li L, Song Y, Wei X, *et al.* Exploring the impacts of urban growth on carbon storage under integrated spatial regulation: A case study of Wuhan, China [J]. *Ecological Indicators*, 2020, 111: 106064.
- [13] Zhu W, Zhang J, Cui Y, *et al.* Ecosystem carbon storage under different scenarios of land use change in Qihe catchment, China [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2020, 30(9): 1507—1522.
- [14] 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 [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2016, 75(1): 44—58.
- [15] Basse R M, Omrani H, Charif O, *et al.* Land use changes modelling using advanced methods: Cellular automata and artificial neural networks. The spatial and explicit representation of land cover dynamics at the cross-border region scale [J]. *Applied Geography*, 2014, 53: 160—171.
- [16] Shi M, Wu H, Fan X, *et al.* Trade-Offs and Synergies of Multiple Ecosystem Services for Different Land Use Scenarios in the Yili River Valley, China [J]. *Sustainability*, 2021, 13(3): 1577.
- [17] Fu Q, Hou Y, Wang B, *et al.* Scenario analysis of ecosystem service changes and interactions in a mountain-oasis-desert system: a case study in Altay Prefecture, China [J]. *Scientific reports*, 2018, 8(1): 1—13.
- [18] Sohl T L, Claggett P R. Clarity versus complexity: Land-use modeling as a practical tool for decision-makers [J]. *Journal of Environmental Management*, 2013, 129: 235—243.
- [19] Yang J, Gong J, Tang W, *et al.* Patch-based cellular automata model of urban growth simulation: Integrating feedback between quantitative composition and spatial configuration [J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2020, 79: 101402.
- [20] 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.
- [21] Chi D, Wang H, Li X, *et al.* Assessing the effects of grazing on variations of vegetation NPP in the Xilingol Grassland, China, using a grazing pressure index [J]. *Ecological Indicators*, 2018, 88: 372—383.
- [22] 吴恒飞, 陈克龙, 张乐乐, 等. 增温对青海湖流域高寒草甸主要温室气体通量的影响[J]. *草原与草坪*, 2021, 41(4): 1—9.
- [23] 徐新良, 刘纪远, 张树文, 等. 中国多时期土地利用土地覆被遥感监测数据集(CNLUCC)[EB/OL]. 中国科学院资源环境科学数据中心数据注册与出版系统(<http://www.resdc.cn/DOI>), 2018. DOI: 10.12078/2018070201.
- [24] 刘纪远, 匡文慧, 张增祥, 等. 20世纪80年代末以来中国土地利用变化的基本特征与空间格局[J]. *地理学报*, 2014, 69(1): 3—14.
- [25] 侯西勇, 徐新良. 21世纪初中国海岸带土地利用空间格局特征[J]. *地理研究*, 2011, 30(8): 1370—1379.
- [26] 张增祥, 汪潇, 温庆可, 等. 土地资源遥感应用研究进展[J]. *遥感学报*, 2016, 20(5): 1243—1258.
- [27] 徐新良. 中国人口空间分布公里网格数据集[EB/OL]. 中国科学院资源环境科学数据中心数据注册与出版系统(<http://www.resdc.cn/DOI>), 2017. DOI: 10.12078/2017121101.
- [28] 徐新良. 中国GDP空间分布公里网格数据集[EB/OL]. 中国科学院资源环境科学数据中心数据注册与出版系统(<http://www.resdc.cn/DOI>), 2017. DOI: 10.12078/2017121102.
- [29] 郭斌, 张莉, 文雯, 等. 基于CA-Markov模型的黄土高原南部地区土地利用动态模拟[J]. *干旱区资源与环境*, 2014, 28(12): 14—18.
- [30] 陈飞, 高佩玲, 郎新珠, 等. 基于GIS和Markov模型的土地利用时空变化研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2012, 26(8): 74—78.
- [31] 孔君治, 杜泽玉, 杨荣, 等. 黑河中游土地利用/覆被变化及其对碳储量影响的预测[J]. *中国沙漠*, 2019, 39(3): 87—97.
- [32] 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+36.
- [33] Wang H, Hu Y, Liang Y. Simulation and spatiotemporal evolution analysis of biocapacity in Xilingol based on CA—Markov land simulation [J]. Environmental and Sustainability Indicators, 2021, 11: 100136.
- [34] 蒋欣阳. 锡林郭勒盟草原景观的时空动态和景观服务的权衡分析[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2017.

Prediction of carbon storage change in Xilingol grassland based on Markov-PLUS and inVEST models

LIU Tao¹, LIU Xiao-long^{2,3*}, GUO Li-biao^{2,3}, GAO Shu-peng¹, QU Ran⁴

(1. Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China; 2. School of Information Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China; 3. Inner Mongolia Key Laboratory of Radar Technology and Application, Hohhot 010051, China; 4. Ministry of Ecology and Environmental Center for Satellite Application on Ecology and Environment, Beijing 100094, China)

Abstract: 【Objective】 In order to explore the impact of land use changes on carbon storage, so as to understand the change trend of carbon sequestration capacity of grassland ecosystems. 【Method】 Based on the land use data from 1995 to 2015, combined the scenario analysis method and the Markov-PLUS compound model, the study simulate the spatial distribution of land use in 2035 of Xilingol grassland under historical trend (HT), economic development (ED) and ecological protection (EP) scenarios. The carbon storage estimation result based on InVEST model was used to analyzed the impact of land use changes on carbon storage. 【Result】 1) From 1995 to 2015, the areas of forest and construction land, Xilingol grassland, continued to increase, and grassland area decreased which accounted for the largest percentage land use type. During this period, the carbon storage increased by $18\,228.93 \times 10^3$ t; 2) By 2035, the area would increase mainly in grassland and construction land under HT and ED scenarios, and would increase mainly in forest land and grassland under EP scenario. The carbon storage increments under three scenarios were predicted to be $4\,419.74 \times 10^3$ t, $11\,207.75 \times 10^3$ t and $18\,498.45 \times 10^3$ t, respectively. 【Conclusion】 Markov-PLUS and InVEST models could obtain reliable results in predicting future land use and carbon storage in Xilingol grassland. The simulation results showed that the carbon storage of Xilingol grassland would be in an upward trend from 1995 to 2035. The increase of carbon storage under ecological protection scenario was significantly higher than other scenarios. The transition between forest-grassland and other land uses would be the main reason of the change in carbon storage. This study provides reference for the adjustment and management of the future land use structure in this region.

Key words: land use change; carbon storage; Markov-PLUS model; InVEST model; grassland