



农业资源与环境学报

CSCD 核心期刊
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PLUS-InVEST模型的呼和浩特市多情景土地利用变化动态模拟及碳储量评估

王子昊, 王冰, 张宇飞, 张秋良

引用本文:

王子昊,王冰,张宇飞,张秋良. 基于PLUS-InVEST模型的呼和浩特市多情景土地利用变化动态模拟及碳储量评估[J]. 农业资源与环境学报, 2024, 41(2): 292–304.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2023.0249>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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

农业资源与环境学报. 2021, 38(6): 1010–1019 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0586>

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>

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>

黄淮海地区土地利用转型与粮食产量耦合关系研究

戈大专, 龙花楼, 屠爽爽, 张英男

农业资源与环境学报. 2017, 34(4): 319–327 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0066>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

王子昊, 王冰, 张宇飞, 等. 基于PLUS-InVEST模型的呼和浩特市多情景土地利用变化动态模拟及碳储量评估[J]. 农业资源与环境学报, 2024, 41(2): 292–304.

WANG Z H, WANG B, ZHANG Y F, et al. Dynamic simulation of multi-scenario land use change and carbon storage assessment in Hohhot City based on PLUS-InVEST model[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2024, 41(2): 292–304.



开放科学 OSID

基于PLUS-InVEST模型的呼和浩特市多情景土地利用变化动态模拟及碳储量评估

王子昊¹, 王冰^{1,2*}, 张宇飞¹, 张秋良^{1,2}

(1. 内蒙古农业大学林学院, 呼和浩特 010019; 2. 内蒙古大兴安岭森林生态系统国家野外科学观测研究站, 内蒙古 根河 022350)

摘要:为探究呼和浩特市土地利用变化对生态系统碳储量的影响,本研究基于InVEST模型与PLUS模型模拟预测呼和浩特市在自然发展、生态保护、耕地保护、城市发展4种情景下的土地利用与碳储量。结果表明:1990—2020年呼和浩特市不透水面、林地、草地、水体等土地利用类型的面积呈增加状态,耕地、裸地、灌木地等土地类型的面积呈减少状态,其中灌木地和裸地的土地转出率较高,分别为93.63%和98.24%。InVEST模型估算结果显示,不透水面不断扩张,侵蚀耕地等高碳密度土地类型,造成呼和浩特市1990—2020年碳储量呈逐年递减趋势。2030年自然发展、生态保护、耕地保护、城市发展情景模拟下的呼和浩特市的碳储量与2020年相比均呈现减少状态,其中耕地保护情景碳储量降幅最小,其次为生态保护情景,说明采取合理的保护措施能够有效抑制碳储量下降。耕地保护情景能够有效减缓城市建筑的扩张趋势,生态保护情景则可有效增加水体、草地等生态类用地面积。研究表明,落实耕地和生态保护政策、优化土地利用结构、提高土地利用效率对呼和浩特市的可持续发展均有重要意义。

关键词:呼和浩特市; PLUS模型; InVEST模型; 土地利用; 碳储量

中图分类号: X321; F301.2 文献标志码: A 文章编号: 2095-6819(2024)02-0292-13 doi: 10.13254/j.jare.2023.0249

Dynamic simulation of multi-scenario land use change and carbon storage assessment in Hohhot City based on PLUS-InVEST model

WANG Zihao¹, WANG Bing^{1,2*}, ZHANG Yufei¹, ZHANG Qiuliang^{1,2}

(1. College of Forestry, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010019, China; 2. National Field Scientific Observation and Research Station of Forest Ecosystem of Daxing'anling, Genhe 022350, China)

Abstract: To explore the impact of land use change on ecosystem carbon storage in Hohhot City, this paper simulates and predicts the land use and carbon stock of Hohhot City under four scenarios, namely, natural development, ecological protection, arable land protection, and urban development based on the InVEST and PLUS models. The results showed that the area of land use types, such as impervious surface, forest land, grassland, and water bodies in Hohhot City increased from 1990 to 2020. The area of land types, such as cultivated land, bare land, and shrubs decreased, with shrubs and bare land having the highest land turn-out rate of 93.63% and 98.24%, respectively. The estimation results of the InVEST model indicated that the continuous expansion of anthropogenic ground, erosion of arable land, and other land use high carbon density land types that resulted in a decreasing trend of carbon storage in Hohhot City from 1990 to 2020. The carbon stocks in Hohhot City in 2030 under the abovementioned scenarios are predicted to decrease compared with those in 2020. Carbon stocks in the arable land protection scenario are predicted to decrease the least, followed by the ecological protection scenario, indicating that reasonable protection measures can effectively reduce the decrease of carbon stocks. The arable land conservation scenario can effectively

收稿日期: 2023-04-20 录用日期: 2023-06-13

作者简介: 王子昊(1999—), 男, 内蒙古托克托县人, 硕士研究生, 从事林业遥感研究。E-mail: 18048371031@163.com

*通信作者: 王冰 E-mail: wbingbing2008@126.com

基金项目: 内蒙古农业大学高层次/优秀博士人才引进科研启动项目(NDYB2021-8); 内蒙古自治区重点研发计划项目(2023YFDZ0026)

Project supported: High Level/Excellent Doctoral Talents Introduction Research Initiation Project of Inner Mongolia Agricultural University (NDYB2021-8); The Key R & D Program of Inner Mongolia (2023YFDZ0026)

slow down the expansion of urban buildings, while the ecological conservation scenario can effectively increase ecological land such as water bodies and grasslands. The study shows that the implementation of arable land and ecological protection policies, optimization of land use structure, and improvement of land use efficiency are all important for the sustainable development of Hohhot City.

Keywords: Hohhot City; PLUS model; InVEST model; land use; carbon stock

CO₂等温室气体大量排放引发全球气候变化^[1-2],对生态系统产生了极大的影响^[3],对人类生存和社会经济发展带来了难以预测的影响,温室气体的过量排放已经成为人类社会需要面对的重大挑战^[4-5]。近年来,不断扩张的建设用地侵蚀了林地、草地、水域等生态用地,导致土地利用格局发生明显变化,进而改变了陆地生态系统的碳储量^[6-7]。陆地生态系统碳储量的改变对全球气候变化、陆地生态系统碳循环和大气中CO₂的浓度均有重要影响,陆地生态系统碳储量的增加能够减少大气中CO₂的浓度,其被视为减缓气候变化和温室效应最环保和最有效的方法之一^[8-9]。

中国是世界上最大的发展中国家^[10],在过去几十年里,中国的土地利用格局发生了巨大变化,城市化率从17.92%迅速增长到59.58%^[11],经济快速发展与土地集约利用导致陆地生态系统碳储量持续减少。因此,研究土地利用变化和碳储量之间的关系,准确评估未来土地利用分布格局与陆地生态碳储量的变化,对于社会可持续发展、碳循环的平衡与稳定具有重要意义。

国内外许多学者采用土地利用模拟模型精确预测未来土地利用分布格局及碳储量,其中应用较为广泛的模型有SD^[12]、FLUS^[13]、ANN-CA^[14]、Logistic-CA^[15]模型。帕茹克·吾斯曼江等^[16]耦合InVEST与CA-Markov模型预测了昆明市碳储量的时空变化,研究结果显示,实施耕地保护政策能够减缓碳储量下降幅度。王超越等^[17]使用FLUS与InVEST模型模拟了呼包鄂榆城市群的土地利用及碳储量变化,研究结果表明,FLUS模型在模拟土地利用方面具有较高的模拟精度,生态保护策略的实施可以有效促进城市群碳储量的稳步增长。杨洁等^[18]耦合CA-Markov与InVEST模型对黄河流域碳储量时空变化进行研究,结果表明实施生态保护措施可以有效地促进黄河流域的固碳作用。刘晓娟等^[19]采用FLUS与InVEST模型对中国未来土地利用变化及其对碳储量的影响进行模拟,研究指出,草地生态系统的固碳效率与碳汇功能应被重视与加强。上述研究将未来土地利用模拟模型与生态服务功能相结合,为后续研究奠定了重要基础。然而,这些模型无法有效识别政策对土地利用变换的驱

动与引导作用,难以灵活地模拟多类土地利用类型的斑块级变化,而PLUS^[20]模型与其他模型相比,主要有3个优点:①采用新的分析策略能够更好挖掘各类土地利用变化的诱因;②包含新的多类种子生长机制,可以更精确模拟多类土地利用斑块级的变化;③与多目标优化算法耦合,模拟结果能够更好地支持规划政策以实现可持续发展。

呼和浩特市是内蒙古自治区首府,作为呼包鄂榆城市群的中心纽带城市,其未来发展前景对于西部大开发具有重要的研究价值。但当前对于呼和浩特市未来土地利用分布格局模拟与碳储量预测鲜有研究,故本研究选用模拟精度更高的PLUS模型与InVEST模型耦合对呼和浩特市在自然发展、生态保护、耕地保护、城市发展4种情景下的土地利用变化与碳储量及其分布格局差异进行模拟,旨在探讨呼和浩特市土地利用变化对生态系统碳储量的影响,为提高呼和浩特市土地利用效率、促进生态经济协调发展、提高碳储存水平提供数据支撑。

1 研究区与数据来源

1.1 研究区概况

呼和浩特市(110°46′~112°10′E,39°35′~40°51′N)地处内蒙古自治区中部,北靠阴山山脉,南与黄河相邻,总体地势西南低、东北高,海拔高度介于900~1 200 m。该市属于温带大陆性季风气候,四季变化明显,冬季极端最低气温可达-32.0℃,夏季极端最高气温可达37.3℃,降雨量年际变化较大且分配不均^[21]。呼和浩特市具体区位见图1。

1.2 数据来源

通过阅读大量文献及收集相关资料获得所需数据。随后利用ArcGIS 10.8对获取的数据进行处理,具体数据来源和相关信息见表1。

2 研究方法

2.1 土地利用时空变化格局分析

2.1.1 土地利用转移矩阵

土地利用转移矩阵表示在研究时段内,研究区初期与末期各地类之间相互转移的方向及数值^[24]。公

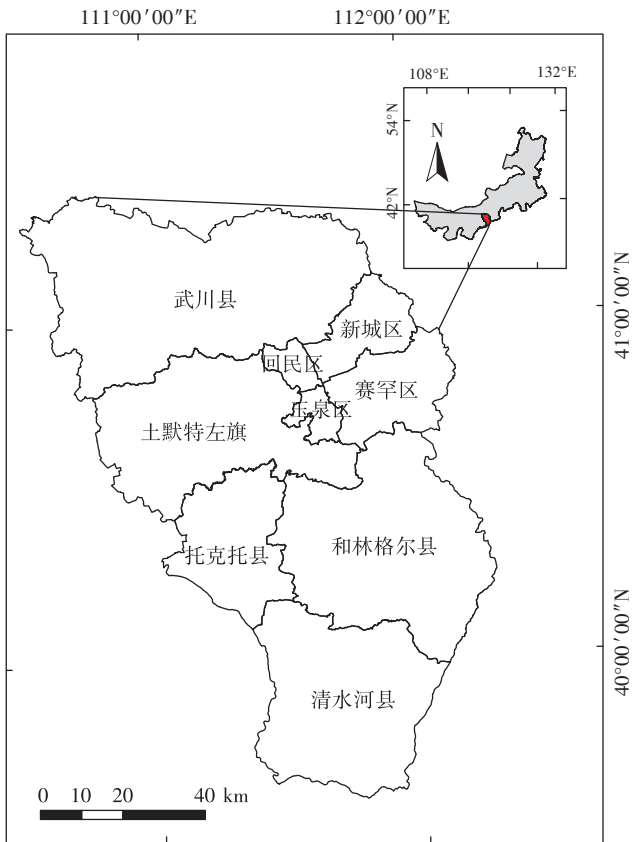


图1 呼和浩特市区位图

Figure 1 Location map of Hohhot

式如下:

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

式中: n 为研究区的土地利用类型总数量; $i,j(i,j=1,2,\dots,n)$ 分别为研究时段土地转移初期与末期的土地利用类型转换面积。

2.1.2 土地利用类型转出率与转入率

土地利用类型转出率为某一段时间内,某种土地利用类型面积转化为其他土地利用类型的面积占此种土地利用类型总面积的比例^[25]。计算公式如下:

$$T_i = \frac{\sum_{j=1}^{n-1} T_{ij}}{L_{i0}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: T_i 为研究时段内 i 种土地利用类型的转出率,%; T_{ij} 为研究时期内 i 地类转变成 j 地类的面积, km^2 ; n 为研究区的土地利用类型总数量; L_{i0} 为研究初期(1990年) i 地类的总面积, km^2 。

表1 数据信息

Table 1 Data information

数据类型 Data type	数据名称 Data name	数据来源 Data source
土地利用数据	1990、2000、2010、2020年呼和浩特市土地利用数据 ^[22]	AI Earth下载 (https://engine-aiearth.aliyun.com/)
自然因子	DEM(高程) 坡度 坡向 土壤类型 年均气温(1990—2020年) 年均降水量(1990—2020年)	中科院资源环境科学数据中心 CRU官方网站
社会经济因子	人口密度 人均GDP 距主干道距离 距高速公路距离 距一级道路距离 距三级道路距离 距铁路距离 距城市距离 距区县距离 距医院距离 距水域距离 距火车站距离	中科院资源环境科学数据中心 OpenStreetMap (https://www.openstreetmap.org/) ArcGIS欧式距离分析
政策规划数据	呼和浩特市土地利用总体规划(1997—2010年) 呼和浩特市土地利用总体规划(2006—2020年)	AI Earth下载 呼和浩特市 人民政府网站

土地利用转入率为在一定时间内,某种地类种由其他地类所转化的面积与该地类总面积的比值。计算公式如下:

$$C_i = \frac{\sum_{j=1}^{n-1} C_{ij}}{L_t} \times 100\% \quad (3)$$

式中: C_i 为研究时段内 i 种土地类型的转入率,%; C_{ij} 为研究时段内 j 地类转入为 i 地类的面积, km^2 ; L_t 为研究末期(2020年) i 地类的总面积, km^2 。

2.1.3 土地利用程度分析

土地利用程度指数可以定量描述人类社会在一段时间内对研究区内土地利用的影响,反映土地利用的集约化程度和变化情况。土地利用程度分级赋值(4级)主要参考庄大方等^[26]的研究。

2.1.4 土地利用综合程度指数

结合土地利用程度分级赋值,计算土地利用综合程度指数。公式如下:

$$L_a = 100 \times \sum_{i=1}^n A_i \times C_i \quad (4)$$

式中: L_a 是研究期内土地利用程度综合指数,其中 $L_a \in$

[100,400], L_a 的值越大,表示土地利用程度越高; A_i 为第*i*级土地利用程度分级指数, $A_i=1,2,3,4$; C_i 为研究区内第*i*级土地利用类型的面积百分比。对呼和浩特市1990、2000、2010年和2020年各区县土地利用综合程度指数进行计算,旨在分析呼和浩特市各辖区土地利用质量与水平。

2.2 基于PLUS模型的土地利用格局预测

本研究使用高性能空间计算智能实验室提出的PLUS模型^[20],该模型集合了用地扩张分析策略(LEAS)与基于多类随机斑块种子的CA模型(CARS),用于预测和推演研究区的土地利用格局。经查阅资料、阅读PLUS模型的指导手册,在自然、社会经济两个维度选择了19个驱动因子(其中,年降水量、人口密度、GDP、年均温需要在使用前先计算其研究时段内的平均值后输入到PLUS模型中)作为驱动变量,将呼和浩特市2000年和2010年的土地利用数据作为初始土地利用数据,计算出各地类发展潜力数据,再以2010年土地利用数据作为模拟基准图输入到PLUS模型中,对呼和浩特市2020年土地利用空间分布进行模拟,并使用Kappa系数对模拟结果进行精度检验^[27],Kappa值介于0~1之间,其判断标准为^[27]:0~0.2为极低一致,>0.2~0.4为一般一致,>0.4~0.6为中等一致,>0.6~0.8为高度一致,>0.8~1为几乎完全一致。该模型中的领域权重参数参考相关政策文件及PLUS模型说明手册进行计算。土地利用需求预测方面,采用PLUS模型中的Markov Chain功能进行预测计算,并根据呼和浩特市土地利用总体规划(2006—2020年)填写转换矩阵。

2.3 基于InVEST模型的碳储量估算

本研究采用InVEST模型中的Carbon模块,结合土地利用和碳密度数据计算碳储量,公式^[28]如下:

$$C=C_{above}+C_{below}+C_{soil}+C_{dead} \tag{5}$$

式中: C 表示生态系统碳储量, $t\cdot hm^{-2}$; C_{above} 表示地上植被碳库, $t\cdot hm^{-2}$; C_{below} 表示地下植被碳库, $t\cdot hm^{-2}$; C_{soil} 表示土壤有机碳库, $t\cdot hm^{-2}$; C_{dead} 表示死亡有机碳库,由于死亡有机质碳储量极低,因此不予考虑^[29]。

InVEST模型运行需要基于不同地类的碳密度数据,本研究参考相关研究,使用温度与降水数据对碳密度数据进行修正^[29-30],修正公式如下:

$$C_{sp}=3.396\ 8\times MAP+3\ 993.1 \tag{6}$$

$$C_{BP}=6.798\times e^{0.005\ 4\times MAT} \tag{7}$$

$$C_{BT}=28\times MAT+398 \tag{8}$$

式中: MAP 表示年均降水量,mm; MAT 表示年均

温, $^{\circ}C$; C_{sp} 表示根据降水量计算得到的土壤碳密度, $t\cdot hm^{-2}$; C_{BP} 和 C_{BT} 分别表示由年均降水量与年均温换算得到的植被碳密度, $t\cdot hm^{-2}$ 。分别将呼和浩特市与全国的年均温与年均降水量代入上式中,计算得到的比值即为碳密度修正系数,最后将全国性数据碳密度乘以修正系数,得到呼和浩特市碳密度值。修正系数计算公式如下:

$$K_B=K_{BP}\times K_{BT}=\frac{C_{BP}'}{C_{BP}''}\times\frac{C_{BT}'}{C_{BT}''} \tag{9}$$

$$K_S=\frac{C_{sp}'}{C_{sp}''} \tag{10}$$

式中: K_B 与 K_S 分别表示植被修正系数与土壤密度修正系数; C_{BP}' 和 C_{BP}'' 表示通过年均降水量所获得的呼和浩特市与全国的植被碳密度数据; C_{sp}' 和 C_{sp}'' 表示由年均降水量得到的呼和浩特市与全国的土壤碳密度数据; C_{BT}' 和 C_{BT}'' 表示由年均温计算所获得的呼和浩特市与全国的植被碳密度数据,计算结果如表2所示。

表2 呼和浩特市各土地利用类型碳密度($t\cdot hm^{-2}$)
Table 2 Carbon density of land use type in Hohhot($t\cdot hm^{-2}$)

土地利用类型 Type of land use	地上植被 碳库 C_{above}	地下植被 碳库 C_{below}	土壤有机 碳库 C_{soil}	死亡有机 碳库 C_{dead}
耕地	1.44	20.43	147.53	0
林地	10.74	29.34	114.05	0
灌木地	0.56	0.36	27.82	0
草地	8.94	21.90	135.96	0
水体	0.76	0	0	0
裸地	1.57	7.43	24.13	0
不透水面	0.63	0	106.16	0

3 结果与分析

3.1 1990—2020年呼和浩特市土地利用时空变化格局

3.1.1 土地利用面积变化

由表3可知,呼和浩特市主要由7种土地利用类型组成(湿地所占面积极小,通过1990—2020年的转移矩阵分析,发现其由耕地转换而成,因此将其值归类为耕地,便于后续进行PLUS模型分析)。1990—2020年呼和浩特市各地类总体变化较为明显,草地和耕地是该市的主要地类,分别占总面积的51%以上和36%以上,不透水面的面积总体上有所增加,增加面积为422.53 km^2 ,草地面积总体上呈现波动式上升,面积增加452.77 km^2 ,这一变化主要得益于呼和浩特市实施的禁牧政策,以及大力发展人工种草并积极实行舍饲圈养等措施。林地面积稳步增加,30年

间增加了 214.37 km²,这得益于呼和浩特市总体规划编制的指导,“在开发中保护、在保护中开发”的基本方针指导了生态建设用地规模和布局,提高了森林覆盖率。

1990—2020年,耕地、灌木地和裸地面积都有所减少,灌木地、裸地和水体面积变化较小,总面积占比变化均不超过1%,相比之下,耕地面积波动较大,减少了1 010.56 km²。通过对其他地类面积变化及土地转移矩阵的分析发现,不透水面积增加是造成耕地面积减少的主要原因,此外,呼和浩特市在1990—2020年期间实施了大规模的造林种草环境治理工程,这也对耕地面积的减少产生了一定的影响。

3.1.2 土地利用转移分析

由土地利用转移矩阵(表4)可知,1990—2020年呼和浩特市转出土地利用类型主要为草地和耕地,转出面积分别为1 501.49 km²和2 185.74 km²;而转入的主要地类为草地、耕地和不透水面,转入面积分别为1 954.25、1 175.17 km²和428.91 km²。随着呼和浩特

市经济快速发展和人口数量的增加,城市的扩展不可避免地侵占耕地,导致耕地面积不断减少,为应对这一局面,《呼和浩特市土地利用总体规划(2006—2020年)》明确提出要强化对耕地的保护,特别是基本农田的保护。未来,呼和浩特市将继续加强对基本农田与一般耕地的保护。

由呼和浩特市1990—2020年各土地利用类型转出率(表4)可知,土地利用类型转出率从高到低为裸地(98.24%)、灌木地(93.63%)、水体(34.04%)、耕地(29.65%)、草地(16.83%)、不透水面(4.05%)、林地(3.87%)。土地利用类型转出率越高,说明此种地类稳定性越低越易被其他地类所占据;相反,转出率越低则表明该种土地利用类型稳定性越高,越难以转换为其他地类。根据表4可知,灌木地和裸地的转出率最高,其结构相对不稳定,不透水面与林地转出率相对较低,说明其结构相对稳定,不易被侵占。另一方面,根据呼和浩特市1990—2020年各土地利用类型转入率可知,裸地和湿地的转入率最高,分别为89.19%和100%,

表3 呼和浩特市1990—2020年各地类面积及比例

Table 3 Area and proportion of land use types in Hohhot in 1990, 2000, 2010 and 2020

地类 Type of land use	1990		2000		2010		2020	
	面积 Area/km ²	比例 Proportion/%	面积 Area/km ²	比例 Proportion/%	面积 Area/km ²	比例 Proportion/%	面积 Area/km ²	比例 Proportion/%
不透水面	157.62	0.92	207.93	1.21	369.58	2.15	580.15	3.37
草地	8 924.09	51.86	9 091.26	52.83	9 517.83	55.30	9 376.86	54.49
耕地	7 372.83	42.84	7 150.31	41.55	6 542.00	38.01	6 362.27	36.97
灌木地	54.77	0.32	18.51	0.11	9.52	0.06	7.24	0.04
林地	600.40	3.49	669.69	3.89	708.46	4.12	814.77	4.73
裸地	51.47	0.30	27.98	0.16	8.99	0.05	8.43	0.05
湿地	0	0	1.48×10 ⁻³	8.60×10 ⁻⁶	0	0	1.48×10 ⁻³	8.60×10 ⁻⁶
水体	47.42	0.28	42.92	0.25	54.75	0.32	58.90	0.34

表4 呼和浩特市1990—2020年土地利用面积转移矩阵(km²)

Table 4 Land use area transfer matrix of Hohhot City from 1990 to 2020(km²)

年份 Year	土地利用类型 Type of land use	2020								转出率 Rollout rate
		不透水面 Impervious surface	草地 Grassland	耕地 Cultivated land	灌木地 Shrub land	林地 Woodland	裸地 Bare ground	湿地 Wetland	水体 Waters	
1990	不透水面	151.24	2.66	2.24	0	0.04	0.01	0	1.43	4.05%
	草地	117.27	7 422.61	1148.90	2.18	213.89	6.18	0	13.07	16.83%
	耕地	306.74	1 849.31	5 187.09	0	15.96	1.32	1.48×10 ⁻³	12.41	29.65%
	灌木地	2.22×10 ⁻³	43.78	0.06	3.49	7.44	2.96×10 ⁻³	0	0	93.63%
	林地	0.08	21.02	0.55	1.57	577.14	5.18×10 ⁻³	0	0.03	3.87%
	裸地	2.27	35.94	11.62	0	0.06	0.91	0	0.68	98.24%
	水体	2.55	1.54	11.80	0	0.25	2.96×10 ⁻³	0	31.28	34.04%
	转入率	73.93%	20.84%	18.47%	51.80%	29.17%	89.19%	100%	46.89%	

说明其他土地利用类型倾向于转变为裸地和湿地这两种土地利用类型,同时不透水面的转入率也较高,为73.93%,这表明在1990—2020年期间,呼和浩特市城市建筑持续侵占其他地类,结合转入率与转出率分析,呼和浩特市需制定可持续发展规划,平衡城市建设与自然保护,避免对林地和草地等自然地类的损害。

3.1.3 各县区土地利用综合程度

土地利用综合程度指数综合考虑了城市土地的居住、工业、商业、交通等各种利用方式。从表5可知,1990—2020年呼和浩特市土地利用综合程度指数有所增加,尤其是近年来增长较快,其原因可能是多方面的。首先,随着城市化的推进,呼和浩特市

的城市规模和人口数量都在不断增加,需要更多的居住用地。其次,随着经济的发展,呼和浩特市产业结构也发生改变,需要更多的土地来建设新的工业和商业用地。然而,也有些地区的土地利用综合程度指数有所减少,如清水河县和武川县。这可能是由于这些地区的经济发展相对滞后,需要更多的政策支持和投资才能推动其土地利用的发展。此外,这些地区的土地利用可能受到环境保护和生态保护等因素的限制,导致土地利用综合程度指数降低。综上所述,呼和浩特市土地利用综合程度指数的增加是多种因素综合作用的结果。

3.2 呼和浩特市土地利用格局模拟及多情景预测

本研究使用2000年和2010年的土地利用数据作为初始土地利用数据,运用PLUS模型模拟了呼和浩特市2020年土地利用分布格局,并使用Kappa系数对模拟结果精度进行检验,结果表明Kappa系数达0.80,总体精度达0.89,表明模型具有较高的可靠性。因此,该模型可用于预测未来的土地利用格局。图2展示了呼和浩特市2020年实际与模拟土地利用情况。

在对PLUS模型的模拟精度进行验证后,使用2000年与2010年土地利用数据预测了呼和浩特市2030年自然发展情景、生态保护情景、耕地保护情景、城市发展情景四种情景下的土地利用情况。自然发展情景指各类用地的发展情况延续当前的发展趋势,不做调整;生态保护情景限制林地、草地和水域等

表5 呼和浩特市各县区土地利用综合程度指数
Table 5 Comprehensive index of land use degree in each counties and districts of Hohhot City

辖区 Name of the jurisdiction	1990	2000	2010	2020
呼和浩特市	253.48	253.86	255.06	259.83
和林格尔县	240.87	239.09	238.93	242.98
回民区	249.12	251.05	253.93	263.33
清水河县	236.48	233.32	225.43	222.23
赛罕区	262.08	265.38	267.39	275.07
土默特左旗	258.16	257.17	260.33	266.26
托克托县	268.12	271.94	276.43	285.51
武川县	231.54	231.18	226.33	221.08
新城区	232.61	233.36	230.83	235.11
玉泉区	302.36	302.29	315.97	326.91

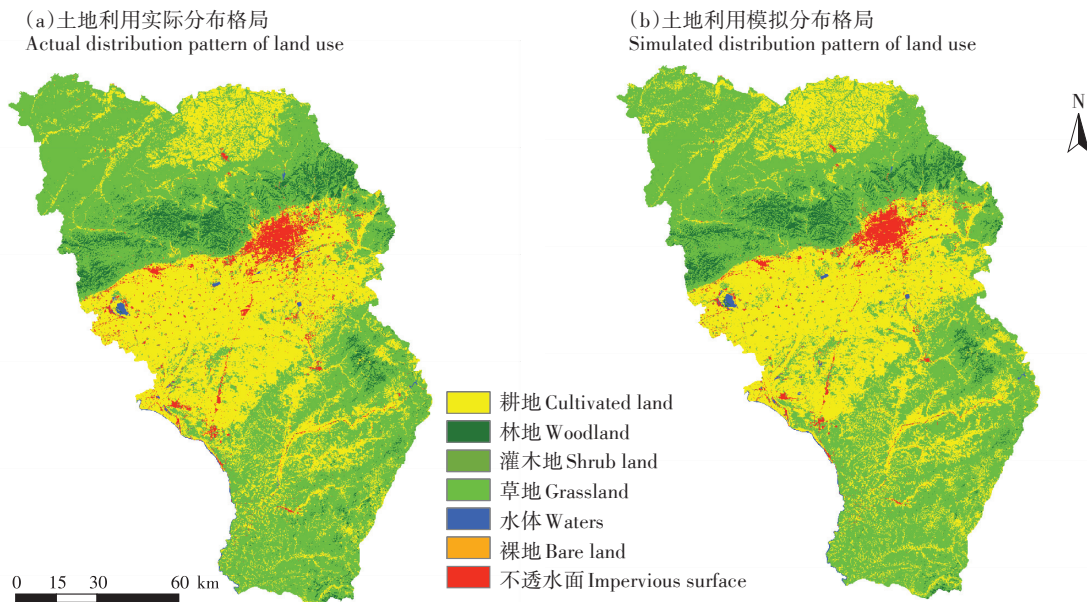
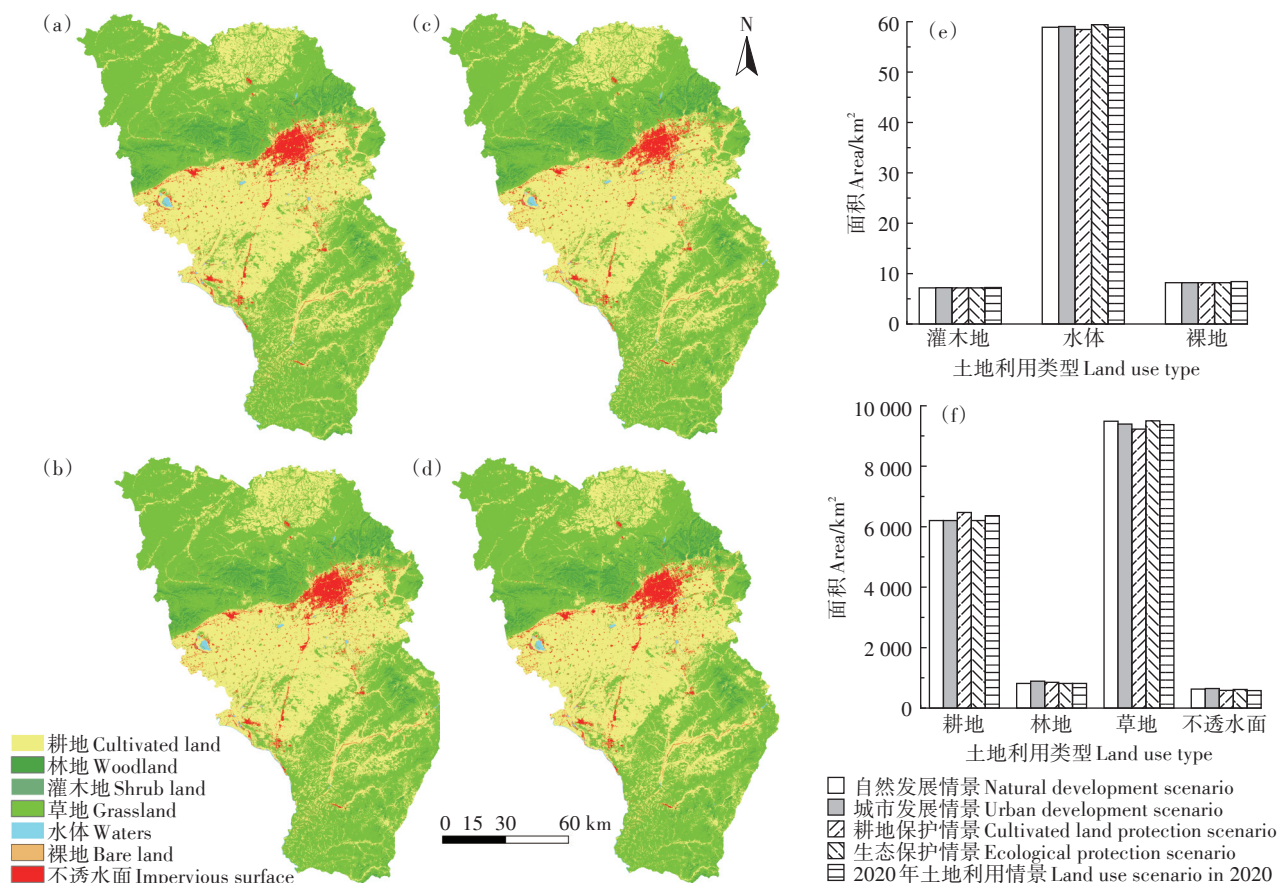


图2 呼和浩特市2020年实际与模拟土地利用类型分布
Figure 2 Actual and simulated distribution pattern of land use of Hohhot in 2020

生态用地向其他用地转换;耕地保护情景则是严格把控其他地类的扩张侵占耕地;城市发展情景即为其他地类优先转为不透水面。图3为呼和浩特市2030年自然发展情景、生态保护情景、耕地保护情景、城市发展情景下各地类面积对比。

结合图2a与图3可知,呼和浩特市2030年在四种发展情景下,灌木地和裸地的面积基本相同,其中裸地面积比2020年有所减少。在耕地保护情景下,耕地面积为6 468.11 km²,比2020年增加了1.67%,而不透水面面积减小,表明耕地保护措施取得一定成效,与其他三种情景相比,耕地面积均增加267.73 km²,表明实施耕地保护政策,严格管控其他地类侵占耕地,能够有效地保护耕地。从空间分布看,与呼和浩特市2020年土地分布格局相比,耕地面积在整个研究区均有所增加,不透水面面积的减小主要集中在

研究区中部地区。自然发展情景与生态保护情景土地利用格局类似,因为在《呼和浩特市土地利用总体规划(2006—2020年)》中明确提出实施退耕还林(草),严禁其他地类随意侵占草地、林地、灌木、水体等生态类用地。与呼和浩特市2020年土地分布格局对比,在自然发展情景中,不透水面面积的增加主要分布在呼和浩特市玉泉区、回民区、赛罕区、新城区,草地面积在研究区中南部有所增加;在生态保护情景中,水体增加主要集中在研究区西部,草地面积增加集中在研究区南部;在城市发展情景下,不透水面面积相较于2020年增加了68.07 km²,而耕地面积减少了161.89 km²,这说明在城市发展情景下不透水面的扩张侵占了耕地面积。从空间分布来看,不透水面面积增加主要集中于呼和浩特市玉泉区、回民区、赛罕区和新城区,草地面积减少主要集中在研究区南部。



a,b,c,d分别为自然发展情景、生态保护情景、耕地保护情景、城市发展情景下的土地利用空间分布图,e,f为2020年实际各地类面积与2030年四种情景下的各地类面积对比图。

a,b,c, and d are the spatial distribution maps of land use under natural development scenario, ecological protection scenario, cultivated land protection scenarios and urban development scenario, respectively; e and f are the comparison maps of actual land use area in 2020 and areas under four scenarios in 2030.

图3 2030年呼和浩特市多情景土地利用对比

Figure 3 Comparison of multi-scenario land use in Hohhot in 2030

3.3 呼和浩特市碳储量变化评估

3.3.1 各土地利用类型碳储量

应用InVEST模型对呼和浩特市1990—2020年各土地利用类型的碳储量进行评估,结果如表6所示。1990、2000、2010、2020年总碳储量分别为28 501.9万、28 546.0万、28 446.5万t和28 298.9万t,由此可见,呼和浩特市1990—2020年碳储总量整体呈现下降趋势,30年间碳储量减少 2.03×10^6 t。通过对主要土地利用类型分析发现,每一时点的碳储量由高到低分别为草地>耕地>林地>不透水面>裸地>灌木地>水体。2020年,草地的碳储量占比最大,为55.27%,其次

是耕地(38.09%)、林地(4.44%)、不透水面(2.19%)。其中,不透水面、林地、草地碳储量呈增加趋势,而耕地、灌木地、裸地的碳储量减少,结合表6与表4发现,导致上述三种土地类型碳储量减少的原因是呼和浩特市有效实施的退耕还草还林政策,并且呼和浩特市城市面积的扩张使得耕地面积减少,从而导致耕地、裸地、灌木地碳储量减少,这说明城市的发展决策对碳储量的变化起到有效调控作用。

3.3.2 碳储量空间变化特征

从呼和浩特市碳储量的空间分布(图4)可知,1990—2020年呼和浩特市碳储量的变化较为明显,

表6 呼和浩特市1990—2020年各土地利用类型碳储量及占比
Table 6 Carbon storage and proportion of each land use type in Hohhot from 1990 to 2020

土地利用类型 Type of land use	1990		2000		2010		2020	
	碳储量 Carbon storage/ 10 ⁴ t	占比 Proportion/%	碳储量 Carbon storage/ 10 ⁴ t	占比 Proportion/%	碳储量 Carbon storage/ 10 ⁴ t	占比 Proportion/%	碳储量 Carbon storage/ 10 ⁴ t	占比 Proportion/%
水体	0.36	1.26×10^{-3}	0.33	1.14×10^{-3}	0.41	1.46×10^{-3}	0.45	1.58×10^{-3}
灌木地	15.74	5.52×10^{-2}	5.32	1.86×10^{-2}	2.74	9.62×10^{-3}	2.08	7.35×10^{-3}
裸地	17.05	5.98×10^{-2}	9.27	3.25×10^{-2}	2.98	0.01	2.79	9.87×10^{-3}
不透水面	168.33	0.59	222.05	0.78	394.62	1.39	619.55	2.19
林地	925.38	3.25	1 032.18	3.62	1 091.77	3.84	1 255.79	4.44
草地	14 884.99	52.22	15 163.82	53.12	15 873.00	55.80	15 640.19	55.27
耕地	12 490.04	43.82	12 113.08	42.43	11 080.94	38.95	10 778.08	38.09
总计	28 501.89	100	28 546.04	100	28 446.46	100	28 298.93	100

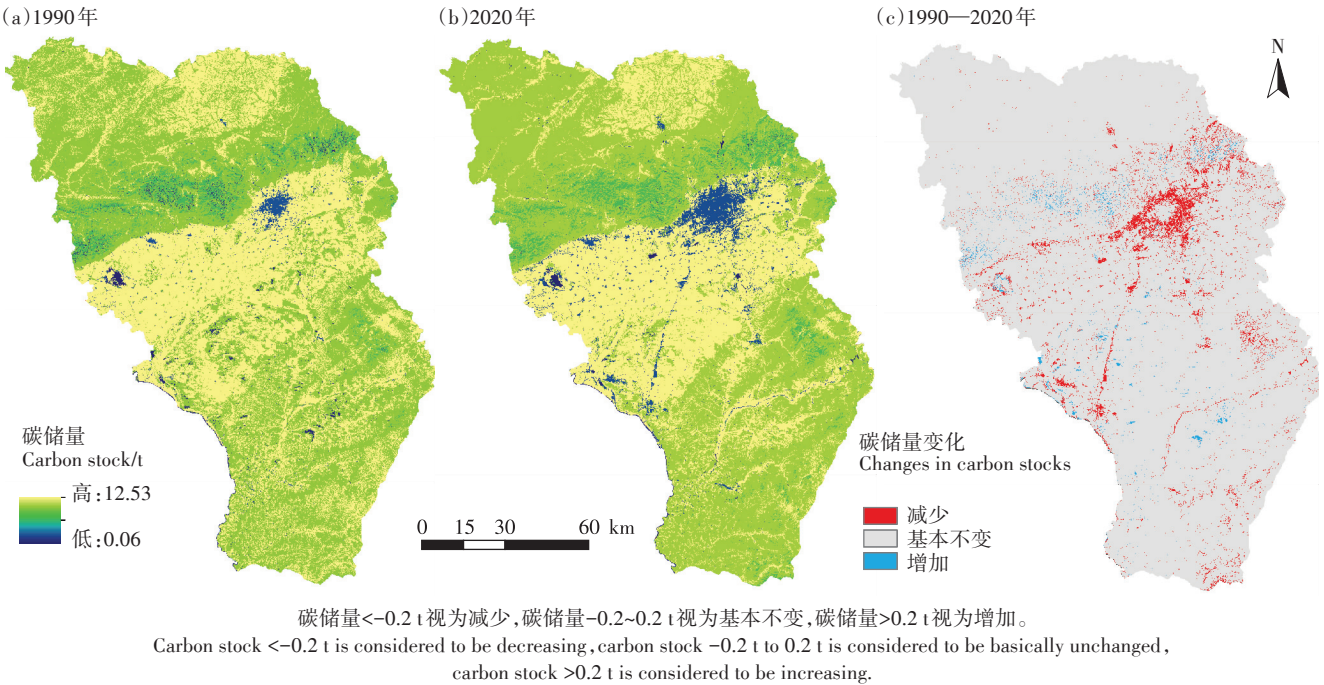


图4 呼和浩特市1990、2020年碳储量空间分布及差值图
Figure 4 Spatial distribution and difference of carbon storage in Hohhot in 1990 and 2020

主要集中在呼和浩特市的中部及中部偏南区域,结合表6可发现,呼和浩特市1990—2020年的碳储量变化主要归因于不透水面、草地、林地、耕地等地类之间的相互转化。

3.3.3 2030年碳储量预测

由图5可知,呼和浩特市2030年土地利用在城市发展情景、耕地保护情景、生态保护情景和自然发展情景下碳储量分别为28 234.4万、28 285.0万、28 261.5万t和28 256.7万t。与2020年的碳储总量相比,四种土地利用情景下的碳储量均有所减少,其中耕地保护情景下碳储量降幅最小,为0.05%,其次为生态保护情景,这表明合理的保护措施可以有效避免碳储量的减少,而在城市发展情景下碳储量降幅最大,为0.22%。分析发现,在城市发展情景下不透水面面积持续扩张,侵占了耕地等高碳密度地类,导致呼和浩特市碳储量减少,这与薛万来等^[31]和李月等^[32]研究结果一致,即城市化会导致生态系统碳储量下降。

4 讨论

4.1 土地利用变化驱动力分析

本研究对呼和浩特市1990—2020年土地利用分布格局进行了评价。图6显示了1990—2020年呼和浩特市土地利用分布格局变化驱动因子的贡献度,各类用地驱动力分析误差均低于0.11,表明效果较好。由图6可知,呼和浩特市1990—2020年对耕地有较高贡献度的驱动因素是高程,因为呼和浩特市整体地势西北低、东南高,导致呼和浩特市在不同海拔处气候条件差异较大,极端的气候条件会限制农作物的生长,因此耕地的开垦应在适合农作物生长的地形条件

下进行。对林地、灌木地空间分布格局变化有较高贡献度的驱动因素为高程、坡向与坡度,草地地类转化则主要受到高程影响,这主要是因为林地、灌木地、草地大量分布在呼和浩特市较高海拔地区,而坡向不同使植物的光照、水分等条件也会有所差异,因此坡向也是造成林地、灌木地土地类型变化的重要驱动因子。对水体贡献度较高的驱动因子为高程、距水域距离、人口、GDP等因素,裸地地类的空间格局变化主要与高程、GDP、距主干道距离、城市灯光等因素有关。而对于不透水面,高程、城市灯光、距汽车站距离、距城市距离、距铁路距离、距高速公路距离、距一级道路距离是贡献度较高的驱动因子,其中,高程对不透水面变化的影响较大,这主要是因为城市建设的难度与经济成本通常受到地形因素的影响^[33]。

4.2 土地利用变化对碳储量的影响

土地利用变化被认为是导致全球陆地生态系统碳储量变化的重要因素之一。1990—2020年呼和浩特市耕地面积减少1 010.56 km²,林地面积增加214.37 km²,草地面积增加452.77 km²,水体面积增加了11.48 km²,灌木地面积减少了47.53 km²,不透水面面积增加了422.53 km²。1990—2020年呼和浩特市碳储量呈现减少趋势,30年减少了2.03×10⁶ t,其主要原因是不透水面面积持续增加,导致呼和浩特市生态系统碳储量下降。孙健等^[34]对2000—2020年台州市陆地生态系统碳储量进行了研究,发现大量耕地转换为建设用地,导致台州市陆地生态系统碳储量下降,这与本研究结果一致。孙欣欣等^[35]对南京市20年的碳储量进行了研究,发现南京市的城市扩张侵占了大量碳储量较高的地类,如耕地和林地,从而使碳储量

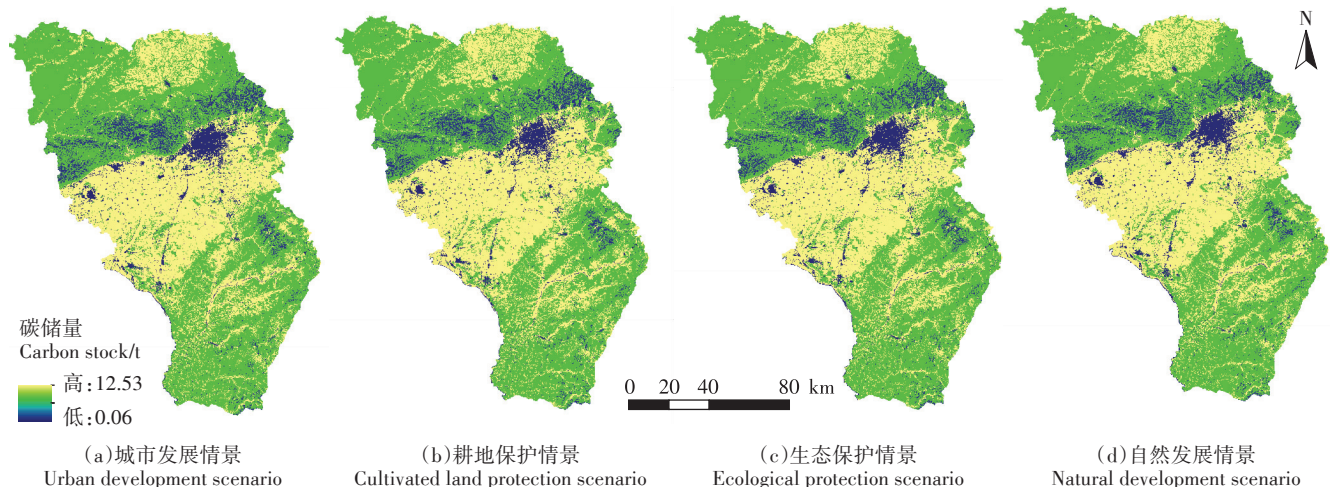


图5 呼和浩特市2030年各情景下碳储量空间分布

Figure 5 Spatial distribution of carbon storage under each scenario in Hohhot in 2030

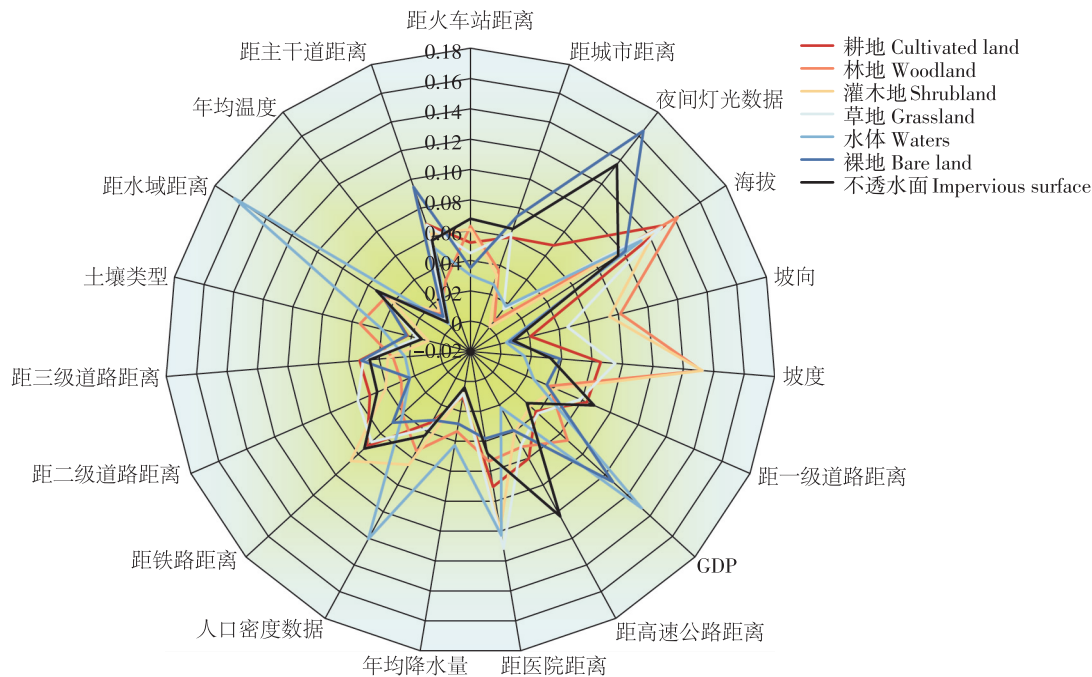


图6 1990—2020年各用地扩张因子驱动图

Figure 6 Driving factors map of land use expansion from 1990 to 2020

呈现下降趋势,这与本研究结果一致。吴楠等^[36]在研究安徽省陆地生态系统碳储量对土地利用变化的响应时,设置了5个情景,发现由于建设用地的扩张,安徽省生态系统碳储量在5种情景下均出现了不同程度的下降。

根据PLUS模型对呼和浩特市2030年多种情景下的土地利用碳储量模拟可知,虽然耕地保护措施能够有效保障粮食安全,但会对草地生态系统造成影响,进而导致碳储总量下降;而在城市发展情景下不透水面侵占耕地、草地等高碳密度地类,导致碳储总量下降;在自然发展与生态保护情景下,虽然草地、水体等生态用地面积增加,但耕地面积有所减少,从而造成经济效益损失。

4.3 不确定分析与展望

本研究基于PLUS与InVEST模型耦合,为模拟未来土地利用与碳储量评估提供了一种新的方法,引入自然和社会经济等驱动因子,基于2000—2010年土地扩张趋势预测2030年4种情景下的土地利用及碳储量空间分布格局,然而PLUS模型虽模拟精度较高,但无法量化政策因素与未来规划。此外,PLUS模型是基于过去的土地扩张趋势预测未来的土地需求,因此PLUS模型在模拟未来土地利用变化分布格局时会为每种地类设置固定的过渡规则,然而这些规则可能受到未来政策与规划的影响而发生转变^[35],同时本研

究在进行未来情景设置时,因《呼和浩特市国土空间总体规划(2021—2035年)》并未正式公布,因此本研究只能通过参考其他研究资料进行未来情景设置。虽然情景设置并未结合国土空间规划,但研究结果展示了2030年呼和浩特市在耕地保护、生态保护、自然发展、城市发展4种情景下各地类面积与碳储量的变化。因此本研究结果对于未来制定国土空间规划和可持续发展政策均有一定的参考价值。

虽然近些年InVEST模型已经被广泛应用于碳储量评估,但是InVEST模型也具有一定的局限性,例如,InVEST模型在计算碳储量时只考虑不同地类的碳密度而忽略了植被类型、植被生长、植被年龄结构对碳密度的影响及季节变化导致的碳损失,其次,本研究的碳密度数据来自于文献且选取指标有限,未充分考虑环境与人为活动对碳密度的影响,因此会使碳储量的估算产生不确定性^[36]。

为准确评估该区域生态系统的碳储量,未来研究将围绕以下几点进行补足:①尽可能地选取更高精度划分更精细的土地利用数据;②通过实地调研获取该研究区的碳密度数据;③在进行碳储量计算中考虑环境、人为活动、植被类型差异、植被年龄结构等因素对碳储量的影响;④考虑应用其他土地利用模拟模型对研究区进行模拟,如MCCA模型,该模型与其他土地利用模拟模型有着本质上的不同,其采用混合元胞模拟

机制,能够更好地模拟多组分元细胞的定量和连续变化,在未来土地利用模拟方面具有巨大的潜力;⑤结合国土空间规划设定更为可靠的未来情景,以提供更具价值的政策规划依据。

5 结论与建议

5.1 结论

(1)1990—2020年,呼和浩特市不透水面、林地、草地、水体等土地利用类型的面积呈现增加趋势,耕地、裸地、灌木地等土地利用类型面积呈现减少趋势,其中,灌木地与裸地的土地转出率较高,分别为93.63%和98.24%。

(2)在PLUS模拟的呼和浩特市2030年土地利用自然发展、耕地保护、生态保护、城市发展的4种情景中。与2020年相比,自然发展情景下耕地面积有所减少,草地与不透水面面积有所增加;耕地保护情景下耕地面积大量增加,草地面积与裸地面积缩小;生态保护情景中草地、水体、不透水面面积有所增加,裸地面积有所减少;城市发展情景下不透水面、林地、水体面积有所扩张,耕地、裸地面积缩小。生态情景下可明显增加水体等生态类型面积,耕地保护情景则可有效限制城市用地扩张。在自然发展情景下,不透水面面积主要在呼和浩特市玉泉区、回民区、赛罕区、新城区增加,而草地面积在研究区的中南部有所增加;在生态保护情景中,水体面积主要集中在研究区西部增加,而草地面积集中在研究区南部增加;在自然发展情景下不透水面面积增加主要集中于呼和浩特市玉泉区、回民区、赛罕区、新城区,草地地类面积减少主要集中在研究区南部;在耕地保护情景中,耕地面积在整个研究区均有所增加,不透水面面积主要集中在研究区中部地区减小。

(3)InVEST模型估算结果显示,呼和浩特市1990—2020年期间碳储量总体呈递减趋势。根据PLUS模拟的呼和浩特市2030年土地利用自然发展、耕地保护、生态保护、城市发展的4种情景下,碳储量均呈现不同程度减少。其中,城市发展情景下碳储量减少最为显著,而耕地保护情景下碳储量降幅最小,草地与耕地是呼和浩特市最主要的固碳地类。

5.2 建议

综合考虑未来四种情境下土地利用与碳储量变化,建议应当从可持续土地管理、优化城市发展、生态恢复与保护、耕地保护等4个方面制定发展规划。在自然发展情景下,耕地面积减少,而草地和不透水面

面积增加。为了实现可持续土地管理,应当采取措施保护现有的耕地资源,鼓励农业可持续发展。在城市发展情景下,不透水面、林地和水体面积扩大,而耕地和裸地面积减少。为了实现可持续城市发展,需要制定科学的城市规划和土地利用政策,平衡城市用地扩张和生态保护之间的关系。同时,推动绿色发展,提高能源利用效率,以减少碳排放。在生态保护情景下,草地、水体和不透水面面积增加,而裸地面积减少。为了加强生态系统的恢复和保护,建议制定并实施能够起到优化土地利用结构、增加碳储量的社会经济发展政策与土地利用规划。相关部门应对未造林地进行抚育、补植,对裸地进行人工造林,并加强现有森林的经营与管理,以提高生态系统的固碳能力。在耕地保护情景下,耕地面积大量增加,且碳储量减量最少。为了保护耕地资源并应对气候变化,建议推广可持续农业实践,提高农业生产效率,减少农药和化肥的使用。

总体而言,未来发展应注重实现经济、社会和生态的可持续发展目标,需要综合考虑土地利用、生态保护和碳储量减少等因素,制定综合性政策和措施。

参考文献:

- [1] SOLOMON S, PLATTNER G K, KNUTTI R, et al. Irreversible climate change due to carbon dioxide emissions[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106(6): 1704–1709.
- [2] ABEYDEERA L H U W, MESTHRIGE J W, SAMARASINGHALAGE T I, et al. Global research on carbon emissions: a scientometric review[J]. *Sustainability*, 2019, 11(14): 3972.
- [3] LI S, ZHANG Y, WANG Z, et al. Mapping human influence intensity in the Tibetan Plateau for conservation of ecological service functions[J]. *Ecosystem Services*, 2018, 30: 276–286.
- [4] TIAN L, FU W, TAO Y, et al. Dynamics of the alpine timberline and its response to climate change in the Hengduan Mountains over the period 1985—2015[J]. *Ecological Indicators*, 2022, 135: 108589.
- [5] CRAMER W, GUIOT J, FADER M, et al. Climate change and interconnected risks to sustainable development in the Mediterranean[J]. *Nature Climate Change*, 2018, 8: 972–980.
- [6] NEWBOLD T, HUDSON L N, HILL S L L, et al. Global effects of land use on local terrestrial biodiversity[J]. *Nature*, 2015, 520: 45–50.
- [7] LI S C, BING Z L, JIN G. Spatially explicit mapping of soil conservation service in monetary units due to land use/cover change for the Three Gorges Reservoir area, China[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(4): 468.
- [8] 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[J]. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 2003, 55

- (2):378-390.
- [9] MOLOTOKS A, STEHFEST E, DOELMAN J, et al. Global projections of future cropland expansion to 2050 and direct impacts on biodiversity and carbon storage[J]. *Global Change Biology*, 2018, 24(12): 5895-5908.
- [10] TIAN L, TAO Y, FU W X, et al. Dynamic simulation of land use/cover change and assessment of forest ecosystem carbon storage under climate change scenarios in Guangdong Province, China[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(10):2330.
- [11] ZHU S Y, KONG X S, JIANG P. Identification of the human-land relationship involved in the urbanization of rural settlements in Wuhan City circle, China[J]. *Journal of Rural Studies*, 2020, 77:75-83.
- [12] 曹祺文, 顾朝林, 管卫华. 基于土地利用的中国城镇化SD模型与模拟[J]. 自然资源学报, 2021, 36(4):1062-1084. CAO Q W, GU C L, GUAN W H. China's urbanization SD modelling and simulation based on land use[J]. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(4): 1062-1084.
- [13] 袁雪松, 周俊, 胡蓓蓓, 等. 基于FLUS模型粤港澳大湾区“三生空间”多情景模拟预测[J]. 地理科学, 2023, 43(3):564-574. YUAN X S, ZHOU J, HU B B, et al. Multi-scenario simulation and prediction of ecological-productive-living spaces in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay area based on FLUS model[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2023, 43(3):564-574.
- [14] 黄洪, 牟风云, 张用川, 等. 基于ANN-CA模型的重庆市多级流域耕地景观格局演化及预测[J]. 水土保持研究, 2023, 30(1):379-387. HUANG Q, MOU F Y, ZHANG Y C, et al. Evolution and prediction of cultivated land landscape pattern in multi-level watershed of Chongqing based on ANN-CA model[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(1):379-387.
- [15] 陈春森, 李英彤, 徐兆阳, 等. 基于Logistic-CA模型的资源型城市扩张分析及预测[J]. 测绘与空间地理信息, 2022, 45(7):32-35. CHEN C S, LI Y T, XU Z Y, et al. Analysis and prediction of urban expansion in resource-based cities based on Logistic-CA model[J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2022, 45(7):32-35.
- [16] 帕茹克·吾斯曼江, 艾东, 方一舒, 等. 基于InVEST与CA-Markov模型的昆明市碳储量时空演变与预测[J]. 环境科学, 2024, 45(1):287-299. PARUKE W S M J, AI D, FANG Y S, et al. Spatial and temporal evolution and prediction of carbon storage in Kunming City based on InVEST and CA-Markov model[J]. *Environmental Science*, 2024, 45(1):287-299.
- [17] 王超越, 郭先华, 郭莉, 等. 基于FLUS-InVEST的西北地区土地利用变化及其对碳储量的影响:以呼包鄂榆城市群为例[J]. 生态环境学报, 2022, 31(8):1667-1679. WANG C Y, GUO X H, GUO L, et al. Land use change and its impact on carbon storage in northwest China based on FLUS-InVEST: a case study of Hu-Bao-Er-Yu urban agglomeration[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2022, 31(8):1667-1679.
- [18] 杨洁, 谢保鹏, 张德罡. 基于InVEST和CA-Markov模型的黄河流域碳储量时空变化研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(6):1018-1029. YANG J, XIE B P, ZHANG D G. Spatio-temporal evolution of carbon stocks in the Yellow River basin based on InVEST and CA-Markov models[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2021, 29(6):1018-1029.
- [19] 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.
- [20] LIANG X, GUAN Q F, 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] 董茜. 呼和浩特市土地覆被变化对城市热岛影响研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2021:25-28. DONG Q. Study on the impact of land cover change on urban heat island in Hohhot[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2021:25-28.
- [22] YANG J, HUANG X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019[J]. *Earth System Science Data*, 2021, 13(8):3907-3925.
- [23] CHEN Z Q, YU B L, YANG C S, et al. An extended time series(2000-2018) of global NPP-VIIRS-like nighttime light data from a cross-sensor calibration[J]. *Earth System Science Data*, 2021, 13(3):889-906.
- [24] 蔡婉莹. 成都市土地利用景观格局变化研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2019:26-27. CAI W Y. Study on landscape pattern change of land use in Chengdu[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2019:26-27.
- [25] 郭燕燕. 基于CLUE-S模型的深圳市土地利用变化模拟[D]. 武汉: 武汉大学, 2017:20-21. GUO Y Y. Simulation of land use change in Shenzhen based on CLUE-S model[D]. Wuhan: Wuhan University, 2017:20-21.
- [26] 庄大方, 刘纪远. 中国土地利用程度的区域分异模型研究[J]. 自然资源学报, 1997, 12(2):105-111. ZHUANG D F, LIU J Y. Study on the model of regional differentiation of land use degree in China[J]. *Journal of Natural Resources*, 1997, 12(2):105-111.
- [27] 袁雪. 基于PLUS模型的武汉市土地利用变化情景模拟与景观生态风险研究[D]. 南昌: 东华理工大学, 2022:46-48. YUAN X. Scenario simulation of land use change and landscape ecological risk research in Wuhan based on PLUS model[D]. Nanchang: East China University of Technology, 2022:46-48.
- [28] 孙方虎, 方凤满, 洪伟林, 等. 基于PLUS和InVEST模型的安徽省碳储量演化分析与预测[J]. 水土保持学报, 2023, 37(1):151-158. SUN F H, FANG F M, HONG W L, et al. Evolution analysis and prediction of carbon storage in Anhui Province based on PLUS and InVEST model[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(1):151-158.
- [29] 张楚强, 向洋, 方婷, 等. LUCC影响下太原市生态系统碳储量时空变化及预测[J]. 安全与环境工程, 2022, 29(6):248-258. ZHANG C Q, XIANG Y, FANG T, et al. Spatio-temporal evolution and prediction of carbon storage in Taiyuan ecosystem under the influence of LUCC[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2022, 29(6):248-258.

- [30] 徐丽, 何念鹏, 于贵瑞. 2010s 中国陆地生态系统碳密度数据集[J]. 中国科学数据(中英文网络版), 2019, 4(1):90-96. XU L, HE N P, YU G R. A dataset of carbon density in Chinese terrestrial ecosystems(2010s)[J]. *China Scientific Data*, 2019, 4(1):90-96.
- [31] 薛万来, 朱莎莎, 朱梦洵, 等. 基于 FLUS-InVEST 模型的永定河流域碳储量功能变化分析[J]. 水利水电技术(中英文), 2023, 54(9):13-25. XUE W L, ZHU S S, ZHU M X, et al. Carbon storage function in Yongding River basin based on the FLUS-InVEST model[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2023, 54(9):13-25.
- [32] 李月, 罗红芬. 基于 InVEST 模型的黔中喀斯特地区建设用地扩张碳储量变化研究[J]. 西北林学院学报, 2024, 39(1):185-192. LI Y, LUO H F. Carbon storage change of construction land expansion in central Guizhou's karst region based on InVEST model[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2024, 39(1):185-192.
- [33] 牛统莉, 熊立华, 陈杰, 等. 基于 PLUS 模型的长江流域土地利用变化模拟与多情景预测[J/OL]. 武汉大学学报(工学版):1-16(2023-03-14) [2023-04-12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1675.T.20230313.1823.002.html>. NIU T L, XIONG L H, CHEN J, et al. Land use simulation and multi-scenario prediction of the Yangtze River basin based on PLUS model[J/OL]. *Engineering Journal of Wuhan University*: 1-16 (2023-03-14) [2023-04-12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1675.T.20230313.1823.002.html>.
- [34] 孙健, 於静, 莫晨剑, 等. 2000—2020 年台州市陆地生态系统碳储量对土地利用变化的响应研究[J]. 中国资源综合利用, 2023, 41(3):185-187. SUN J, YU J, MO C J, et al. Study on response of carbon storage of terrestrial ecosystem to land use change in Taizhou City from 2000 to 2020[J]. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2023, 41(3):185-187.
- [35] 孙欣欣, 薛建辉, 董丽娜. 基于 PLUS 模型和 InVEST 模型的南京市生态系统碳储量时空变化与预测[J]. 生态与农村环境学报, 2023, 39(1):41-51. SUN X X, XUE J H, DONG L N. Spatiotemporal change and prediction of carbon storage in Nanjing ecosystem based on PLUS model and InVEST model[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2023, 39(1):41-51.
- [36] 吴楠, 陈凝, 程鹏, 等. 安徽省陆地生态系统碳储量变化对未来土地覆被情景的响应[J]. 长江流域资源与环境, 2023, 32(2):415-426. WU N, CHEN N, CHENG P, et al. Evaluation of carbon storage on terrestrial ecosystem responses to land cover change under five future scenarios in Anhui Province[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2023, 32(2):415-426.

珍惜点滴能源 创造美好环境



《农业资源与环境学报》公益宣传