

黑龙江省土地利用监测及预测

李浩南¹, 于颖^{1,2*}, 杨曦光¹, 范文义^{1,2}

(1. 东北林业大学 林学院, 哈尔滨 150040; 2. 森林生态系统可持续经营教育部重点实验室, 哈尔滨 150040)

摘 要: 土地是人类生活中不可或缺的部分, 分析土地利用现状有助于深入透彻地理解环境情况和经济发展之间的关系, 实现更合理的土地利用模式。预测未来的土地利用情况有助于提高土地资源的可持续性管理, 同时对评估碳潜力提供科学依据。以黑龙江省为研究区域, 对黑龙江省 2000—2020 年土地利用现状进行分析, 并采用斑块生成土地利用变化模拟模型 (patch-generating land use simulation, PLUS) 耦合长短期记忆模型 (long short-term memory, LSTM) 的方法, 模拟预测黑龙江省 2030 年的土地利用情况。结果表明, 1) 验证 PLUS-LSTM 模型的 Kappa 系数为 0.878, 6 种地类 (耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地) 模拟相对误差均低于 15%, 相比于传统模型来说精度较高, 可以用来模拟黑龙江省 2030 年土地利用情况; 2) 与 2020 年相比, 2030 年黑龙江省林地、草地、水域和建设用地的面积都有所增加。其中, 建设用地的变化率最高, 为 8.57%; 林地面积增加 2 584.26 km², 扩张区域主要在中部地区; 草地的扩张区域主要在西南部。耕地和未利用地面积减少, 其中, 未利用地变化最大, 变化率为 29.68%。

关键词: 黑龙江省; 土地利用; 监测; 预报; 长短期记忆模型 (LSTM)

中图分类号: S757

文献标识码: A

DOI: 10.7525/j.issn.1006-8023.2025.06.002

Land Use Monitoring and Forecasting in Heilongjiang Province

LI Haonan¹, YU Ying^{1,2*}, YANG Xiguang¹, FAN Wenyi^{1,2}

(1. College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China; 2. Key Laboratory of Sustainable Forest Ecosystem Management, Ministry of Education, Harbin 150040, China)

Abstract: Land is an indispensable part of human life. The analysis of land use status is helpful to deeply understand the relationship between environmental conditions and economic development, and to achieve a more reasonable land use model. Predicting future land use will help improve the sustainable management of land resources and provide a scientific basis for assessing carbon potential. Taking Heilongjiang Province as the research area, the current situation of land use in Heilongjiang Province from 2000 to 2020 was analyzed, and the patch-generating land use simulation (PLUS) model coupled with the long short-term memory (LSTM) model was adopted to simulate and predict the land use situation in Heilongjiang Province in 2030. The results showed that: 1) The Kappa coefficient for verifying the PLUS-LSTM model was 0.878. The relative simulation errors of the six land types (cultivated land, forest land, grassland, water area, construction land, and unused land) were all less than 15%. Compared with the traditional model, it had higher accuracy and can be used to simulate the land use situation in Heilongjiang Province in 2030. 2) Compared with 2020, the area of forest land, grassland, water area, and construction land in Heilongjiang Province would increase in 2030. Among them, the change rate of construction land was the highest, 8.57%; the area of forest land increased by 2 584.26 km², mainly in the central region; the expansion of grassland was mainly in the southwest. The area of cultivated land and unused land decreased, and the unused land changed the most, with a change rate of 29.68%.

Keywords: Heilongjiang Province; land utilization; monitoring; forecasting; long short-term memory model (LSTM)

收稿日期: 2025-03-19

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (32471855); 东北林业大学碳中和专项科学基金项目 (HFW220100054)。

第一作者简介: 李浩南, 硕士研究生。研究方向为森林遥感。E-mail: 664428027@qq.com。

*通信作者: 于颖, 博士, 教授。研究方向为森林遥感。E-mail: yuying4458@163.com。

引文格式: 李浩南, 于颖, 杨曦光, 等. 黑龙江省土地利用监测及预测[J]. 森林工程, 2025, 41(6): 1116-1126.

LI H N, YU Y, YANG X G, et al. Land use monitoring and forecasting in Heilongjiang Province[J]. Forest Engineering, 2025, 41(6): 1116-1126.

0 引言

土地不仅是人类生存和发展的核心基础,也为生物多样性和生态系统服务提供了重要保障^[1]。土地利用覆盖变化(land use and cover change, LUCC)是人类活动影响全球环境变化的重要指标,对预测全球气候变化过程至关重要。土地利用变化趋势也成为未来陆地生态系统碳汇动态变化研究的重要参考因素。因此,如何深入理解其动态变化机制,准确估计模拟土地利用变化的时空特征,已成为当前学者研究的热点^[2]。

早期的土地利用变化预测主要采用马尔可夫链模型(Markov)^[3]、系统动力学模型(system dynamics, SD)^[4]和 Logistic 回归(logistic regression, LR)模型^[5]等,主要用于数量方面的预测,但是对于空间方面的预测难以实现,元细胞自动机模型(cellular automata, CA)^[6]等主要用于空间方面的预测。但是土地利用变化的过程不仅涉及到了数量方面的变化,还包含了空间尺度的改变,因此越来越多的研究者将数量与空间方面的模型耦合起来进行土地利用现状模拟。通过土地利用转换及其效应模型(conversion of land use and its effect at small region extent, CLUE-S)^[7]、CA-Markov模型^[8]和未来土地利用模拟模型(future land-use simulation, FLUS)^[9]等实现,但对于空间方面的模拟精度较低,同时近些年来多情景土地利用模拟需求增加,这些模型都有一定的局限性。相比之下,斑块生成土地利用变化模拟模型(patch-generating land use simulation, PLUS)于2021年提出,基于栅格数据,挖掘土地扩张的驱动因素来模拟预测未来土地利用情况的CA模型^[10-12]。相较于CA模型而言,PLUS模型在空间上有自己独特的方法,模拟的精度更高,同时可以对不同情景的土地利用情况进行模拟,表现更好,因此越来越多的人开始使用PLUS模型进行研究^[12]。周道媛等^[13]利用PLUS模型模拟预测未来土地利用变化,进一步对生态系统服务价值进行评估。席梅竹等^[14]利用PLUS模型对滹沱河流域山区段的生态格局进行了模拟,结果表明,相比于CA-Markov模型、FLUS-Markov模型而言,PLUS模型精度更高,同时可以对多情景土地利用情况进行模拟,效果更好。虽然PLUS模型对于空间尺度以及多情景预测具有不错的效果,但是在生态系统服务变化、生态保护以及碳储量评估方面也有不足,因此更多的学者将PLUS模型与其他模型耦合起来进行土地利用现状模拟以及生态系统服务的评估。王想等^[15]利用PLUS-InVEST(integrated valuation of ecosystem services and trade-offs, InVEST)耦合模型对延庆区

土地利用以及碳储量模拟进行预测,并提出生态优化方法,对推进延庆区可持续发展具有重要作用。

在深度学习模型中,循环神经网络(recurrent neural network, RNN)用于捕捉时间序列数据之间的依赖关系,并传递历史信息。然而,RNN在处理长距离依赖时表现不足。长短期记忆网络(long short-term memory, LSTM)有效解决了这一问题,能够建模具有长时间依赖性的序列数据,并充分考虑历史时序中的土地变化,因此在土地利用变化中得到了广泛应用^[16-17]。Boulila等^[18]利用CNN-LSTM模型实现了城市扩张模拟预测。Xu等^[19]对比了多层感知器(multi-layer perceptron, MLP)和LSTM模型在城市增长动态模拟中的表现,由于LSTM能更好地捕捉时间信息,因此在这方面优于MLP。刘春霖等^[20]利用LSTM-CA模型对未来土地利用进行模拟预测,经过与MLP-CA模型对比分析发现,LSTM-CA模型精度较高。深度学习模型相比于传统模型而言,对于长时间的非线性关系的数据处理表现更好,但是在空间方面的模拟预测不如传统模型,因此PLUS模型还可以与深度学习方法相结合,实现精度更高、更准确的耦合模型。

研究将PLUS模型与LSTM算法相结合,模拟预测生态保护情景下2030年黑龙江省土地利用变化情况,不仅能为短期土地利用规划提供依据,还能为土地利用可持续发展制定科学的方案,推动社会、经济与环境的协调发展^[21]。同时,土地利用结构的变化对碳循环也有着极大的影响,尤其是在应对气候变化和推动绿色低碳发展的背景下,优化土地利用结构已经成为实现碳排放目标的关键。因此,通过土地利用的模拟与预测,为实现“碳达峰”“碳中和”提供理论依据。

1 研究区概况及数据预处理

1.1 研究区概况

黑龙江省位于中国东北部,其地理范围为121°11′—135°05′E, 43°26′—53°33′N,东西跨度为14个经度,南北跨度为10个纬度。北部和东部与俄罗斯隔江相望,西部与内蒙古自治区相接,南部则与吉林省相邻。黑龙江省属于寒温带与温带大陆性季风气候,夏季炎热且降水丰富,冬季则寒冷干燥。地势呈现出西北、北部和东南部较高,东北和西南部较低的特点。土地利用类型主要分为6大类:耕地,主要分布在松嫩平原和三江平原;林地,主要分布在大小兴安岭及东南部的山区;草地,主要集中在松嫩平原的西部;水域,主要分布在三江平原地区和松花江流域;建设用地,主要集中在城市化进程显著的松花江沿岸城市;未利用地,主要分

布在大兴安岭等地区。

1.2 数据收集及预处理

中国土地覆盖数据集(China land cover dataset, CLCD)是武汉大学利用谷歌地球引擎(google earth engine, GEE)基础设施创建的首个年度中国土地覆盖数据集。该数据集的准确率为79.31%,总体高于全球10 m地表覆盖数据(finest resolution observation and monitoring of global land cover, FROM-GLC)、30 m全球地表覆盖数据(GlobeLand30)、MODIS三级数据土地覆盖类型产品(moderate resolution imaging spectroradiometer, MCD12Q1)和欧航局300 m土地利用数据(ESA CCI land cover, ESACCI_LC)产品精度,具有较高的时空一致性^[22]。研究将土地利用类型进行重分类,分为

耕地、林地、草地、水域、建设用地以及未利用地6大类。耕地指用来种植农作物的土地;林地指被森林和林木覆盖的土地,包括天然林和人工林;草地是覆盖有草本植物的土地,包括天然草原和人工草地;水域包括河流、水库和湿地等水体;建设用地指用于建筑和基础设施的土地,包括住宅、商业、工业和公共设施用地等;未利用地指尚未开发或使用的土地,包括荒地、闲置地、裸地、沼泽区和自然保护区等。

土地利用变化驱动因子主要包括社会经济和自然环境多方面^[23]。研究综合黑龙江省的土地利用发展政策,共选取12个驱动因子,见表1。将所有数据空间分辨率统一为30 m×30 m,投影采用通用横墨卡托格网系统(universal transverse Mercator grid system, UTM)投影。

表1 数据详情
Tab. 1 Data details

数据类型 Data type	数据介绍 Data introduction	数据来源 Data sources
土地利用数据 Land use data	黑龙江省2000—2020年土地利用分类数据	武汉大学遥感信息处理研究所中国30 m年度土地覆盖
	人口	中国科学院资源环境科学与数据中心
	GDP	中国科学院资源环境科学与数据中心
	邻近高速公路	OpenStreetMap (https://www.openstreetmap.org/)
	邻近一级道路	OpenStreetMap (https://www.openstreetmap.org/)
	邻近二级道路	OpenStreetMap (https://www.openstreetmap.org/)
	邻近三级道路	OpenStreetMap (https://www.openstreetmap.org/)
社会经济数据 Socio-economic data	邻近铁路	OpenStreetMap (https://www.openstreetmap.org/)
	邻近政府	OpenStreetMap (https://www.openstreetmap.org/)
	土壤类型	HWSD v1.2
	邻近水域	OpenStreetMap (https://www.openstreetmap.org/)
	数字高程模型(digital elevation model, DEM)	NASA SRTM1 v3.0
自然环境数据 Natural environmental data	坡度	NASA SRTM1 v3.0

2 研究方法

2.1 土地利用变化速率

土地利用变化速率通常包括单一土地利用动态度和综合土地利用动态度。单一土地利用动态度表示某一类型土地在特定时期内的变化速率(K_i),综合土地利用动态度用于评估区域内所有土地利用类型的总体变化速率(K)^[24]。通常用于评估该土地类型的变化情况,其公式为

$$K_i = \frac{U_{i2} - U_{i1}}{U_{i1} \times T} \times 100\% \quad (1)$$

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n |U_{i2} - U_{i1}|}{\sum_{i=1}^n U_{i1} \times T} \times 100\% \quad (2)$$

式中: K_i 表示第*i*种土地利用类型的动态度; K 表示综合土地利用动态度; U_{i1} 表示第*i*种土地利用类型在初始年份的面积; U_{i2} 表示第*i*种土地利用类型在终止年份的面积; T 表示时间跨度, a 。

2.2 土地利用转移矩阵

土地利用转移矩阵是用于分析不同土地利用类型在特定时间段内相互转换的关键工具。通过对比不同时期的土地利用数据,能够直观展示某一土地类型在起始和终止时间之间的变化情况,即某类土地转变为另一类的面积^[25]。公式为

$$M_{ij} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & \cdots & M_{1n} \\ M_{21} & M_{22} & \cdots & M_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ M_{n1} & M_{n2} & \cdots & M_{nn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: M_{ij} 表示从第*i*类土地类型转化为第*j*类土地类型的面积; n 是土地利用类型的总数。

2.3 LSTM 模型构建

LSTM 由 Hochreiter 等^[26]于 1997 年首次提出,是一种特殊的循环神经网络(RNN),可以有效学习长期的依赖关系,用于模拟预测未来土地利用情况。模型包括前向传播、模型更新和反向传播三大过程,采用 6 层输入和 1 层输出,隐层输出特征向量长度为 100。

1)前向传播。前向传播指从输入层到输出层的信号传递过程,主要包括输入门、输出门和遗忘门。遗忘门负责筛选前一时刻细胞状态中的信息,决定哪些需要保留,哪些需要舍弃,以便为后续的更新腾出空间,清除不再需要的记忆^[27]。

2)模型更新。模型精度评估以及动态更新采用均方误差损失函数(mean squared error, MSE)和 Adam 优化器^[28]来进行。Adam 优化器是一种用于深度学习模型训练的梯度下降算法,其通过自适应调整每个参数的学习率来优化训练过程。与普通梯度下降相比,Adam 能够更快地收敛,并且表现更为优异。

3)反向传播。反向传播阶段,关键在于使用梯度下降法来优化各个门的参数。这一过程中,损失函数的梯度会逐步计算出每个门对整体误差的贡献,从而调整相应的权重和偏置。这有助于网络的整体优化,保证在每次迭代中更新的参数能够提升模型对长期依赖关系的学习能力^[29]。

2.4 PLUS-LSTM 融合预测土地利用变化

本研究采用 PLUS-LSTM 模型进行研究,其流程如下。

1)提取土地扩张。土地扩张模块是通过模拟不同土地类型之间的转换过程,生成未来的土地利用斑块。该模块的特点是将土地变化看作是一种空间聚集现象,从而更好地模拟现实中的扩张行为。将 2000 年与 2020 年黑龙江省土地利用数据输入其中,提取出当中土地利用扩张。

2)土地扩张分析策略(LEAS 模块)。LEAS 模块主

要是基于随机森林算法来识别土地扩张的驱动因素并评估其扩张潜力。将提取出的土地利用扩张部分,输入到 LEAS 模块当中,结合驱动因子和限制参数得到每种土地利用类型发展潜力,以及每一个驱动因子对不同地类的贡献度。

3)区域模拟的元胞自动机模型(CARS 模块)。CARS 模块是 PLUS 模型中用于预测未来土地利用变化空间格局的重要部分。其基于元胞自动机的原理,通过邻域效应和空间规则,动态分配和转换不同类型的土地,进而模拟出未来的土地利用情况。

4)土地利用预测及模拟。研究以 2000 年黑龙江省土地利用数据、土地利用发展潜力数据作为输入,对转移矩阵以及邻域等参数进行设置。线性回归与马尔科夫链模拟预测出 2020 年的土地利用需求数量,LSTM 算法模拟预测出 2020 年的土地利用需求数量,分别输入到 PLUS 模型中,模拟预测得到 2020 年黑龙江省的土地利用现状图,进行精度验证后,对黑龙江省 2030 年生态保护情景下土地利用现状进行模拟预测分析。

2.5 精度验证

采用 Kappa 系数(K_{appa})与相对误差对土地利用模拟精度进行验证^[30]。Kappa 系数排除了随机一致性可能带来的高准确性,使其能够更精确地反映模型的预测效果。其取值范围通常为 $[0, 1]$, $0.6 \leq K_{\text{appa}} \leq 0.8$,说明模型具有良好的一致性; $K_{\text{appa}} \geq 0.8$,说明模型具有非常高的一致性。相对误差是测量值与真实值之间误差相对于真实值的百分比,在 5%~15%均为合理,低于 5%则精度很高;超过 15%则说明存在较大误差。

$$K_{\text{appa}} = \frac{P_o - P_e}{1 - P_e} \quad (4)$$

式中: P_o 是实际的一致性,表示分类器正确分类样本的比例,通过混淆矩阵中对角线元素的总和除以总样本数计算得到; P_e 是期望的一致性,表示在假设随机分类时预期的准确率,可以通过混淆矩阵中每个分类的行和列的和的乘积,再除以总样本数的平方计算得出^[31]。

3 结果与分析

3.1 黑龙江省 2020 年土地利用精度验证

2020 年黑龙江省土地利用数据模拟值与实际数据对比结果见表 2。PLUS 模型与 PLUS-LSTM 模型对比结果见表 3,由表 3 可知,总 Kappa 系数为 0.878,每种地类模拟相对误差均低于 15%,模拟精度较高,误差较小;PLUS 模型与 PLUS-LSTM 模型相比,PLUS-LSTM 模型模拟精度更高。

表 2 2020 年黑龙江省土地利用模拟误差检验
Tab. 2 Simulation error test of land use in Heilongjiang Province in 2020

土地利用类型 Land use type	模拟面积/km ² Simulated area	实际面积/km ² Actual area	误差/km ² Error	相对误差/% Relative error
耕地 Cultivated land	147 890.55	139 242.05	8 648.50	6.21
林地 Forest land	148 630.20	157 686.41	-9 056.21	-5.74
草地 Grass land	4 101.78	3 967.66	134.12	3.38
水域 Water area	5 072.27	4 871.57	200.70	4.12
建设用地 Construction land	9 858.61	9 712.82	145.79	1.50
未利用地 Unused land	459.82	532.74	-72.92	-13.69

表 3 模型精度对比
Tab. 3 Comparison of model accuracy

模型 Model	Kappa 系数 Kappa coefficient
PLUS	0.826
PLUS-LSTM	0.878

3.2 2020 年黑龙江省土地利用驱动因子贡献度

不同的驱动因子对于土地利用模拟预测的影响

程度不同,驱动因子对于不同的土地利用类型的影响大小也不一样,以林地举例,驱动因子影响如图 1 所示。

由图 1 可知,对于黑龙江省内林地面积扩张的主要驱动因子是坡度、数字高程模型(DEM)和邻近高速公路的距离;GDP、邻近铁路的距离和人口对于林地的影响适中;影响最小的是邻近三级道路的距离。林地增加区域主要分布在坡度较低的地区;而坡度较高的区域,林地扩张的范围较小。

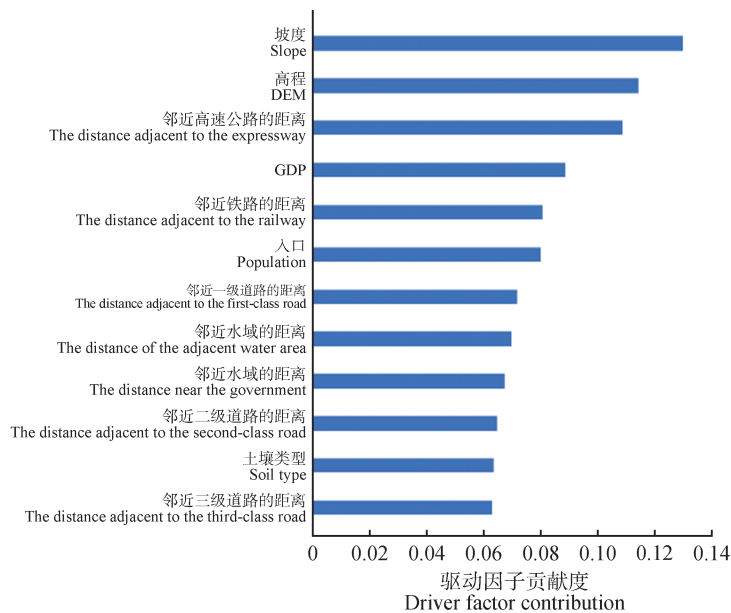


图 1 不同驱动因子对于林地的影响

Fig. 1 The influence of different driving factors on forest land

3.3 黑龙江省 2000—2020 年土地利用变化

3.3.1 土地利用结构特征

根据黑龙江省 2000 年、2010 年和 2020 年的土地

利用现状图获得黑龙江省土地利用结构特征,如图 2 所示,对 6 种地类面积及占比情况进行统计,见表 4。2000—2020 年,各土地利用类型总面积占比从小到大

基本保持不变。其中,林地一直是总面积中占比最多的,2020年达到了157 686.41 km²,接近土地利用总面积的一半;而未利用地总面积占比最少,2020年为

532.74 km²,占土地利用总面积的0.17%。不难看出,耕地和林地是黑龙江省土地利用类型中最主要的组成部分。2020年,耕地和林地两者之和占总面积的93.96%。

表4 黑龙江省2000—2020年土地利用类型面积和占比

Tab. 4 The area and proportion of land use types in Heilongjiang Province from 2000 to 2020

土地类型 Land type	2000		2010		2020	
	面积/km ² Area	占比/% Proportion	面积/km ² Area	占比/% Proportion	面积/km ² Area	占比/% Proportion
耕地 Cultivated land	138 454.50	43.81	135 206.73	42.79	139 242.05	44.06
林地 Forest land	160 002.23	50.63	161 404.58	51.08	157 686.41	49.90
草地 Grass land	5 549.22	1.76	5 953.56	1.88	3 967.66	1.26
水域 Water area	4 126.45	1.31	4 474.65	1.42	4 871.57	1.54
建设用地 Construction land	6 503.69	2.06	8 136.29	2.57	9 712.82	3.07
未利用地 Unused land	1 377.15	0.43	837.42	0.26	532.74	0.17
土地类型总和 Total land types	316 013.24	100	316 013.24	100	316 013.24	100

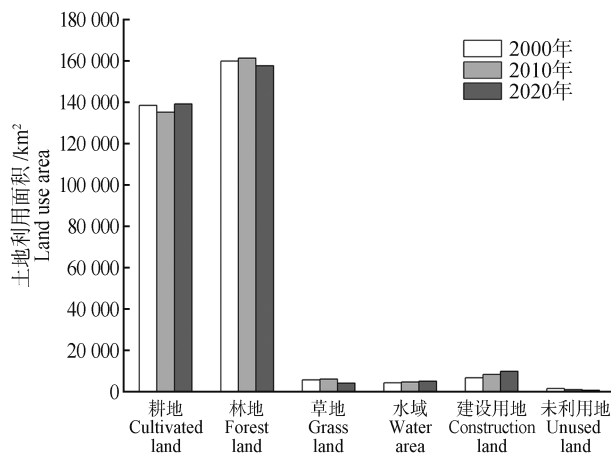


图2 黑龙江省2000—2020年土地利用结构特征

Fig. 2 Land use structure characteristics of Heilongjiang Province from 2000 to 2020

2000—2010年,由于退耕还林、生态保护等政策影响,耕地面积由138 454.50 km²减少到135 206.73 km²,林地面积由160 002.23 km²增加到161 404.58 km²。2010—2020年,国家对粮食安全更为重视,同时加大了农业开发力度,耕地面积由135 206.73 km²增加到139 242.05 km²。城市化建设加快,部分林地被占用,林地面积减少,由161 404.58 km²减少到157 686.41 km²。

草地面积在2000—2010年基本稳定保持不变,但

2010—2020年,部分草地被作为其他用途,面积有所减少,由5 953.56 km²减少到3 967.66 km²。由于国家重视水资源保护,同时加大对湖泊的管理和恢复,水域面积在2000—2020年,整体都呈现出增加的趋势,由2000年的4 126.45 km²增加到2020年的4 871.57 km²。建设用地面积在2000—2020年,随着社会不断发展,越来越多的人口向城市集中,城市化建设不断扩大,多种土地利用类型都向建设用地转变,建设用地面积呈现出增加的趋势,由2000年的6 503.69 km²增加到9 712.82 km²。未利用地面积在2000—2020年呈现出减少的趋势,占比由0.43%减少到0.17%。

3.3.2 黑龙江省2000—2020年土地利用变化速率

黑龙江省2000—2020年单一土地利用动态度和综合土地利用动态度见表5,由表5可知,在2000—2020年,耕地面积先减少后增加,增加的速度比减少的速度快,整体表现出增加的趋势;林地面积先增加后减少,增加的速度较为缓慢,整体表现出减少的趋势;草地面积先增加后减少,整体表现出减少的态势;水域面积是稳步增加的,且增加的速度比2000—2010年增加的速度要快;建设用地面积也是稳步增加,且增加的速度较快;未利用地面积都有所减少,这说明黑龙江省的城市化建设越来越快,越来越多的未利用地都转化为供人们使用的其他类型土地。

表5 黑龙江省2000—2020年单一土地利用动态度和综合土地利用动态度

Tab. 5 Single land use dynamic degree and comprehensive land use dynamic degree in Heilongjiang Province from 2000 to 2020 %

土地类型 Land type	单一土地利用动态度 Single land use dynamic degree		
	2000—2010年 2000 to 2010	2010—2020年 2010 to 2020	2000—2020年 2000 to 2020
耕地 Cultivated land	-0.23	0.30	0.06
林地 Forest land	0.09	-0.23	-0.14
草地 Grass land	0.73	-3.34	-2.85
水域 Water area	0.84	0.89	1.81
建设用地 Construction land	2.51	1.94	4.93
未利用地 Unused land	-3.92	-3.64	-6.13
综合土地利用 Integrated land use	0.12	0.19	0.15

2000—2010年,黑龙江省综合土地利用动态度为0.12%,表明这10 a间,土地利用变化较为稳定,城市化和经济发展对其影响较小,土地类型转化相对保守。

在2010—2020年,黑龙江省综合土地利用动态度为0.19%,土地利用变化速度有所提升,经济活动、城市扩张和工业发展是主要推动因素。同时,国家政策的调整也加速了土地利用变化。2000—2020年,黑龙江省综合土地利用动态度为0.15%。土地利用变化相对稳定,尽管2010—2020年有所加快,但相比其他快速发展的地区,黑龙江省整体变化较低。这主要受制于该省的地理条件、农业主导的经济结构和相关政策,限制了土地利用类型的显著变动。

3.3.3 黑龙江省2000—2020年土地利用转移矩阵

研究统计生成了黑龙江省2000—2010年、2010—2020年、2000—2020年的土地利用转移矩阵,见表6—表8。

由土地利用转移矩阵可以看出,2000—2020年,黑龙江省耕地面积有所增加,耕地的主要来源是林地,同时,耕地的流出主要也是林地;虽然林地面积有所减少,但是保留率很高,说明林业资源相对稳定,主要是转化为了耕地;草地的转化比例不是很大,主要是向耕地流出,说明草地资源有所减少;水域面积增加,主要是由于耕地的流入,说明对水资源越来越重视;建设用地面积大幅增加,这也恰恰说明了城市化进程加快,越来越多的土地向建设用地转变;未利用地面积大幅减少,向多种土地利用类型转变,说明了对于未利用地的开发力度越来越大。

表6 黑龙江省2000—2010年土地利用转移矩阵

Tab. 6 Land use transfer matrix of Heilongjiang Province from 2000 to 2010

km²

2000—2010	耕地 Cultivated land	林地 Forest land	草地 Grass land	水域 Water area	建设用地 Construction land	未利用地 Unused land	2000年土地利用类型面积 Land use type area in 2000	转出总计 Total transferred out
耕地 Cultivated land	128 616.13	5 071.36	2 837.69	608.49	1 309.24	11.59	138 454.50	9 838.37
林地 Forest land	4 572.83	155 318.99	23.70	10.68	76.02	0.01	160 002.23	4 683.23
草地 Grass land	1 403.77	919.87	2 964.17	32.97	181.58	46.87	5 549.22	2 585.05
水域 Water area	207.99	81.70	31.50	3 647.55	133.57	24.14	4 126.45	478.89
建设用地 Construction land	7.19	0.51	0.18	133.87	6 361.65	0.30	6 503.69	142.04
未利用地 Unused land	398.83	12.15	96.33	41.09	74.23	754.52	1 377.15	622.64
2010年土地利用类型面积 Land use type area in 2010	135 206.73	161 404.58	5 953.56	4 474.65	8 136.29	837.42	316 013.24	—
转入总计 Total transferred in	6 590.60	6 085.59	2 989.39	827.10	1 774.65	82.91	—	—

表 7 黑龙江省 2010—2020 年土地利用转移矩阵
Tab. 7 Land use transfer matrix of Heilongjiang Province from 2010 to 2020 km²

2010—2020	耕地 Cultivated land	林地 Forest land	草地 Grass land	水域 Water area	建设用地 Construction land	未利用地 Unused land	2010 年土地利用类型面积 Land use type area in 2010	转出总计 Total transferred out
耕地 Cultivated land	130 050.93	2 454.78	1 050.49	390.41	1 254.41	5.70	135 206.73	5 155.79
林地 Forest land	6 181.52	154 942.58	157.71	12.46	110.32	0.003 6	161 404.58	6 462.01
草地 Grass land	2 603.53	267.55	2 716.90	56.54	256.46	52.58	5 953.56	3 236.66
水域 Water area	174.65	9.08	3.88	4 171.85	106.11	9.08	4 474.65	302.80
建设用地 Construction land	10.23	0.07	0.25	195.24	7 929.90	0.61	8 136.30	206.39
未利用地 Unused land	221.18	12.35	38.43	45.08	55.62	464.76	837.42	372.66
2020 年土地利用类型面积 Land use type area in 2020	139 242.05	157 686.41	3 967.66	4 871.58	9 712.82	532.73	316 013.24	—
转入总计 Total transferred in	9 191.11	2 743.83	1 250.76	699.72	1 782.92	67.97	—	—

表 8 黑龙江省 2000—2020 年土地利用转移矩阵
Tab. 8 Land use transfer matrix of Heilongjiang Province from 2000 to 2020 km²

2000—2020	耕地 Cultivated land	林地 Forest land	草地 Grass land	水域 Water area	建设用地 Construction land	未利用地 Unused land	2000 年土地利用类型面积 Land use type area in 2000	转出总计 Total transferred out
耕地 Cultivated land	128 519.81	4 457.13	1 919.21	892.45	2 630.11	35.77	138 454.50	9 934.69
林地 Forest land	7 458.82	152 136.70	187.57	31.59	187.38	0.17	160 002.23	7 865.52
草地 Grass land	2 359.79	978.83	1 783.14	50.94	333.83	42.70	5 549.22	3 766.08
水域 Water area	245.31	80.37	10.45	3 628.01	149.81	12.48	4 126.45	498.43
建设用地 Construction land	23.41	0.82	0.61	185.61	6 292.27	0.97	6 503.69	211.42
未利用地 Unused land	634.92	32.54	66.67	82.97	119.42	440.64	1 377.15	936.51
2020 年土地利用类型面积 Land use type area in 2020	139 242.05	157 686.41	3 967.66	4 871.57	9 712.82	532.74	316 013.24	—
转入总计 Total transferred in	10 722.24	5 549.70	2 184.52	1 243.56	3 420.55	92.10	—	—

3.4 黑龙江省 2030 年土地利用变化

运用 PLUS 与 LSTM 耦合模型对黑龙江省生态保护情景下 2030 年土地利用变化进行模拟及预测。由表 9 可知,与 2020 年相比,2030 年黑龙江省林地、草地、水域以及建设用地的面积总体都有所增加,其中,林地面积的变化量最大,增加了 2 584.26 km²,变化率

为 1.64%,增加区域主要分布在中部地区;建设用地的相对增加幅度最大,变化率为 8.57%;草地面积 2030 年为 4 234.58 km²,增加了 266.92 km²,增加区域主要分布在西南部地区;水域面积 2030 年为 5 214.22 km²,增加了 342.65 km²。耕地和未利用地的面积总体减少,其中,耕地面积 2030 年为 135 374.37 km²,相比于 2020 年

的耕地面积,中部以及东部都有所减少,总面积减少了3 867.68 km²,变化率为-2.78%;未利用地面积2030年为374.62 km²,变化量为-158.12 km²,减少幅度最大,变化率为-29.68%,说明城市化进程进一步加快。

表9 2030年黑龙江省土地利用情况及变化
Tab. 9 Land use and change in Heilongjiang Province in 2030

土地类型 Land type	面积/km ² Area	变化量/km ² Variation	变化率/% Rate of change
耕地 Cultivated land	135 374.37	-3 867.68	-2.78
林地 Forest land	160 270.67	2 584.26	1.64
草地 Grass land	4 234.58	266.92	6.73
水域 Water area	5 214.22	342.65	7.03
建设用地 Construction land	10 544.78	831.96	8.57
未利用地 Unused land	374.62	-158.12	-29.68

4 讨论与结论

4.1 讨论

1)2000—2020年,黑龙江省耕地面积呈现出先减少后增加的趋势,这是耕地保护等措施实施所呈现的结果;林地面积先增加后减少;草地、未利用地面积减少;水域、建设用地面积增加。这与王新宇等^[32]的研究结果相同,具有一定的说服力。

2)驱动因子的选择对于模拟预测的精度影响较大,且驱动因子并不是独立作用的,不同的驱动因子组合对结果的影响也不同,本研究尝试并选取了包括自然环境驱动因子和社会经济驱动因子在内的12个关键驱动因子进行黑龙江省土地利用分析以及模拟预测。一方面,自然环境驱动因子,其中对耕地影响最为明显的则是DEM,DEM较高,耕地面积扩张范围较小;另一方面,社会经济驱动因子方面也对土地利用的变化有较大影响,尤其是人口增多以及城市化进程的加快,导致大量耕地转化为了建设用地,这也恰恰说明了不同的驱动因子之间是有较为复杂的组合影响的。本研究也有不足,不同地区的政策不同,对于土地利用的变化也有影响,这一方面并未考虑到,在之后的研究中应该考虑这一问题。

3)LSTM算法相比于传统的时间序列模型,通过其独特的门控机制,能够有效克服梯度消失问题,从而更

好捕捉长期的时序依赖,对于长期的非线性关系,能够达到更好的效果。土地利用变化是一个长期变化的过程,受到多种因素的影响,是一个非线性的关系,LSTM算法在这方面表现更好,且模拟预测精度也较高。但LSTM算法也有一定的局限性,需要大量的训练来达到效果。未来在选取模型进行土地利用模拟预测时,可以选择精度更高的模型进行土地利用模拟预测。

4.2 结论

本研究以黑龙江省为研究区域,分析了2000—2020年这20 a黑龙江省土地利用变化情况,然后使用PLUS模型耦合LSTM模型,对黑龙江省生态保护情景下2030年土地利用情况进行模拟预测。

1)2000—2020年,黑龙江省耕地和林地占据主导地位,占比较高。其中,耕地面积在2000—2010年减少了3 247.77 km²,在2010—2020年增加了4 035.32 km²,总体面积有所增加;林地面积在2000—2010年增加了1 402.35 km²,在2010—2020年减少了3 718.18 km²,总体面积有所减少。另外,草地和未利用地面积都有所减少。水域和建设用地面积有所增加。

2)PLUS模型耦合LSTM模型模拟结果表明,Kappa系数为0.878,精度较高,模型一致性非常高,说明能够准确地模拟黑龙江省未来土地利用情况。

3)模拟出黑龙江省生态保护情景下2030年土地利用情况表明,林地、草地、水域和建设用地面积都有所增加。其中,中部的林地面积增加较为明显;草地的扩张区域主要在西南部;西南部的水域面积增加较为明显;耕地和未利用地面积减少,未利用地变化最大,变化率为-29.68%。总体而言,未来黑龙江省土地利用情况会呈现出集约化的趋势,因此要注重保护土地资源,促进土地利用的可持续化发展。

参 考 文 献

- [1] JIA G, SHEVLIKOVA E, ARTAXO P, et al. Land - climate interactions [M]//Special Report on Climate Change and Land: An IPCC Special Report on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse Gas Fluxes in Terrestrial Ecosystems. IPCC, 2019: 133-206.
- [2] 刘纪远, 宁佳, 匡文慧, 等. 2010—2015年中国土地利用变化的时空格局与新特征[J]. 地理学报, 2018, 73(5): 789-802.
LIU J Y, NING J, KUANG W H, et al. Spatio-temporal patterns and characteristics of land-use change in China during 2010-2015 [J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(5): 789-802.
- [3] 劳国栋. 基于Logistic-CA-Markov模型的杭州湾北岸上

- 海段潮滩时空演变分析与驱动力研究[D]. 上海:上海海洋大学,2021.
- LAO G D. Analysis of the temporal and spatial evolution and driving force of the tidal flat in the Shanghai section of the north shore of Hangzhou Bay based on the Logistic-CA-Markovmodel [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2021.
- [4] 马胜兰,黄军林. 基于SD-FLUS模型的长沙市低碳土地利用多情景模拟[C]//中国服务贸易协会,中国测绘学会,中国遥感委员会. 第十六届智慧城市大会论文集. 湖南师范大学,2023:191-206.
- MA S L, HUANG J L. Multi-scenario simulation of low carbon land use in Changsha City based on SD-FLUS model [C]//China Association of Trade in Services, Chinese Society for Geodesy, Photogrammetry and Cartography, Chinese National Committee for Remote Sensing. Proceedings of the 16th Smart City Conference. Hunan Normal University, 2023:191-206.
- [5] 顾顺业. 基于Logistic回归模型的南昌市土地利用演变驱动力分析[J]. 乡村科技,2023,14(17):114-117.
- GU S Y. Driving force analysis of land use evolution in Nanchang city based on Logistic regression model [J]. Rural Science and Technology, 2023, 14(17): 114-117.
- [6] 邓雅文,林耕,曾穗平. 基于CA-Markov模型的天津市土地利用时空变化模拟研究[J]. 天津城建大学学报,2021,27(6):387-395.
- DENG Y W, LIN G, ZENG S P. Simulation research on temporal and spatial changes of land use in Tianjin municipality based on CA-Markov coupling model [J]. Journal of Tianjin Chengjian University, 2021, 27(6): 387-395.
- [7] 郭洪伟,孙小银,廉丽姝,等. 基于CLUE-S和InVEST模型的南四湖流域生态系统产水功能对土地利用变化的响应[J]. 应用生态学报,2016,27(9):2899-2906.
- GUO H W, SUN X Y, LIAN L S, et al. Response of water yield function of ecosystem to land use change in Nansi Lake Basin based on CLUE-S model and InVEST model [J]. Chinese Journal of applied ecology, 2016, 27 (9) : 2899-2906.
- [8] 詹云军,朱捷缘,严岩. 基于元胞自动机的城市空间动态模拟[J]. 生态学报,2017,37(14):4864-4872.
- ZHAN Y J, ZHU J Y, YAN Y. Dynamic simulation of urban space based on the cellular automata model [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(14): 4864-4872.
- [9] 朱寿红,舒帮荣,马晓冬,等. 基于“反规划”理念及FLUS模型的城镇用地增长边界划定研究——以徐州市贾汪区为例[J]. 地理与地理信息科学,2017,33(5):80-86,127.
- ZHU S H, SHU B R, MA X D, et al. The delimitation of urban growth boundary based on the idea of ‘anti-planning’ and FLUS Model: A case study of Jiawang District, Xuzhou City [J]. Geography and Geo-Information Science, 2017, 33(5): 80-86, 127.
- [10] 雷馨,海新权. 耦合PLUS-InVEST模型的兰州市土地利用变化及碳储量经济价值估算[J]. 地理科学,2025,45(2):339-348.
- LEI X, HAI X Q. Assessing economic value of carbon storage and land use changes based on the coupled PLUS-InVEST model in Lanzhou City [J]. Scientia Geographica Sinica, 2025, 45(2): 339-348.
- [11] 郭伟玲,徐刘洋,贾纪昂,等. 耦合PLUS-CSLE模型预测淮河流域多情景土地利用变化与土壤侵蚀[J]. 水土保持学报,2024,38(6):234-243,252.
- GUO W L, XU L Y, JIA J A, et al. Predicting multi-scenario land use changes and soil erosion in the Huaihe river basin based on coupled PLUS-CSLE model [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38 (6) : 234-243, 252.
- [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] 周道媛,王娟,周凤娟. 基于PLUS模型多情景分析的土地利用变化及生态系统服务价值评估——以福州市为例[J]. 甘肃农业大学学报,2023,58(3):198-209.
- ZHOU D Y, WANG J, ZHOU F J. Evaluation of land use change and ecosystem service value based on multi-scenario analysis of PLUS model—with Fuzhou City as an example [J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2023, 58(3): 198-209.
- [14] 席梅竹,赵中秋,赵颖丽. 基于PLUS模型的2030年滹沱河流域山区段生态承载力时空格局多情景预测[J]. 农业资源与环境学报,2024,41(3):518-529.
- XI M Z, ZHAO Z Q, ZHAO Y L. Multi-scenario prediction of the spatial and temporal patterns of ecological carrying capacity in the mountain section of Hutuo River basin in 2030 based on the PLUS model [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2024, 41 (3) : 518-529.
- [15] 王想,王春雨,吕飞南,等. 基于PLUS-InVEST模型的区县碳储量时空格局变化与碳汇提升策略——以延庆区为例[J]. 应用生态学报,2023,34(12):3373-3384.
- WANG X, WANG C Y, LYU F N, et al. Temporal and spatial variations of carbon storage and carbon sink improvement strategy at the district and county level based on PLUS-InVEST model: Taking Yanqing District as an ex-

- ample[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023, 34(12):3373-3384.
- [16] JIA X, KHANDELWAL A, NAYAK G, et al. Incremental dual-memory LSTM in land cover prediction [C]//Proceedings of the 23rd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, 2017: 867-876.
- [17] WANG H, ZHAO X, ZHANG X, et al. Long time series land cover classification in China from 1982 to 2015 based on Bi-LSTM deep learning [J]. Remote Sensing, 2019, 11(14):1639.
- [18] BOULILA W, GHANDORH H, KHAN M A, et al. A novel CNN-LSTM-based approach to predict urban expansion[J]. Ecological Informatics, 2021, 64:101325.
- [19] XU T, ZHOU D, LI Y. Integrating ANNs and cellular automata - Markov chain to simulate urban expansion with annual land use data [J]. Land, 2022, 11(7): 1074.
- [20] 刘春霖, 夏建新. 基于 LSTM-CA 模型的土地利用动态模拟[J]. 自然资源遥感, 2022, 34(4): 122-128.
LIU C L, XIA J X. Dynamic simulation of land use based on the LSTM-CA model [J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2022, 34(4): 122-128.
- [21] 巩晟萱, 张玉虎, 李宇航. 基于 PLUS-InVEST 模型的京津冀碳储量变化及预测 [J]. 干旱区资源与环境, 2023, 37(6): 20-28.
GONG S X, ZHANG Y H, LI Y H. Spatio-temporal variation and prediction of carbon storage in Beijing-Tianjin-Hebei region-A PLUS-InVEST model approach [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2023, 37(6): 20-28.
- [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] 李国珍. 基于 FLUS 模型的深圳市土地利用变化与模拟研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2018.
LI G Z. Land use change and simulation in Shenzhen based on FLUS model [D]. Wuhan: Wuhan University, 2018.
- [24] 薛晋聪, 陶志梅. 天津市各区土地利用程度差异及动态变化分析 [J]. 合作经济与科技, 2019(8): 8-11.
XUE J C, TAO Z M. Analysis on the difference and dynamic change of land use degree in different districts of Tianjin [J]. Co-Operative Economy & Science, 2019(8): 8-11.
- [25] 毛鸿欣, 贾科利, 高曦文, 等. 1980—2018 年银川平原土地利用变化时空格局分析 [J]. 科学技术与工程, 2020, 20(20): 8008-8018.
MAO H X, JIA K L, GAO X W, et al. Spatiotemporal pattern of land use change in Yinchuan Plain from 1980 to 2018 [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(20): 8008-8018.
- [26] HOCHREITER S, SCHMIDHUBER J. Long short-term memory [J]. Neural Computation, 1997, 9(8): 1735-1780.
- [27] 付浩, 王圣达, 姜山, 等. 基于 ARMA-LSTM 的光功率预测方法 [J]. 光通信技术, 2019, 43(1): 20-23.
FU H, WANG S D, JIANG S, et al. Optical power forecasting method based on ARMA-LSTM [J]. Optical Communication Technology, 2019, 43(1): 20-23.
- [28] 陈存宇, 陈爱喜, 戚晓秋, 等. 基于 MLP 神经网络优化改进的 BW 模型 [J]. 物理学报, 2025, 74(1): 36-46.
CHEN C Y, CHEN A X, QI X Q, et al. Improved BW model based on MLP neural network optimization [J]. Acta Physica Sinica, 2025, 74(1): 36-46.
- [29] 雷雪, 王倩娜, 邓靖琳, 等. 基于 FLUS 模型的眉山市土地利用变化分析及预测模拟 [J]. 四川师范大学学报 (自然科学版), 2022, 45(6): 806-816.
LEI X, WANG Q N, DENG J L, et al. Land use change and spatio-temporal simulation analysis of Meishan City based on FLUS model [J]. Journal of Sichuan Normal University (Natural Science), 2022, 45(6): 806-816.
- [30] 赵霖雨, 崔柳, 王佳, 等. 基于土地利用模拟预测模型分析的城市绿色空间发展多情景模拟及建设时序研究——以湛江市中心城区为例 [J]. 生态学报, 2023, 43(15): 6307-6320.
ZHAO J Y, CUI L, WANG J, et al. Multi-scenario simulation of urban green space development and construction Timeline based on PLUS model analysis: A case study of the central Zhanjiang City [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(15): 6307-6320.
- [31] 马锐, 傅娅, 刘珉杉. 基于 CA-MARKOV 模型的土地利用变化预测及景观格局演变研究——以成都市为例 [J]. 绿色科技, 2023, 25(22): 245-252.
MA R, FU Y, LIU M S. Research on land use change prediction and landscape pattern evolution based on CA-MARKOV model: A case study of Chengdu City [J]. Journal of Green Science and Technology, 2023, 25(22): 245-252.
- [32] 王新宇, 滕浩. 黑龙江省土地利用时空格局演变及驱动因素分析 [J]. 测绘与空间地理信息, 2024, 47(S1): 129-132, 139.
WANG X Y, TENG H. Analysis of spatio-temporal pattern evolution and driving factors of land use in Heilongjiang Province [J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2024, 47(S1): 129-132, 139.