基于 CA-Markov 与 InVEST 模型的吉林省生态系统服务价值模拟及预测

刘家福[1]，席兰兰[1]，张 尧[1]，张 柏[2]

(1. 吉林师范大学 旅游与地理科学学院，吉林 四平 136000；2. 中国科学院 东北地理与农业生态研究所，吉林 长春 130102)

摘 要：[目的] 分析与预测吉林省土地利用演变过程，衡量其对生态系统服务价值的影响程度，为吉林省生态环境保护与改善方针策略的制定提供理论依据。[方法] 基于吉林省 2000，2010 和 2017 年 3 期土地利用数据，采用 CA-Markov 模型对 2024 年的土地利用格局进行模拟预测，利用 InVEST 模型分析吉林省 2000—2024 年生态系统服务价值变化及生境质量时空演变特征。[结果] ①2000—2024 年吉林省耕地、草地、建设用地面积持续增长，林地、水域和未利用土地面积有所减少。②2000—2024 年生态系统服务总价值呈下降趋势，其中森林的生态系统服务价值量最大，水文和气候调节是主要的生态服务功能。③吉林省生境质量在空间分布上呈中西部低，东部高的特征，质量在不断退化，城市周边和各大水系流域沿岸退化严重。[结论] 吉林省中部及西部地区生境质量下降较为严重，应注重城市周边及水系的保护与合理利用。

关键词：土地利用；CA-Markov；生态系统服务价值；InVEST 模型

文献标识码：B **文章编号**：1000-288X(2020)06-0153-07 **中图分类号**：F129.9

文献参数：刘家福，席兰兰，张尧，等. 基于 CA-Markov 与 InVEST 模型的吉林省生态系统服务价值模拟及预测[J]. 水土保持通报，2020，40(6)：153-159. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2020.06.022；Liu Jiafu，Xi Lanlan，Zhang Yao，et al. A study on simulation and prediction of ecosystem service value in Jilin Province based on CA-Markov and InVEST model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2020，40(6)：153-159.

A Study on Simulation and Prediction of Ecosystem Service Value in Jilin Province Based on CA-Markov and InVEST Model

Liu Jiafu[1]，Xi Lanlan[1]，Zhang Yao[1]，Zhang Bai[2]

(1. *College of Tourism and Geographic Sciences，Jilin Normal University，Siping，Jilin* 136000，*China*；
2. *Northeast Institute of Geography and Agro-ecology，Chinese Academy of Sciences，Changchun，Jilin* 130102，*China*)

Abstract：[Objective] The impacts of the process of land use evolution on ecosystem service value in Jilin Province were analyzed and predicted in order to provide theoretical basis for the formulation of ecological environment protection and improvement policies and strategies in Jilin Province. [Methods] Based on the land use data of Jilin Province in 2000，2010 and 2017，the CA-Markov model was used to simulate and predict the land use pattern in 2024，and InVEST model was used to analyze the change of ecosystem service value and the spatial-temporal evolution characteristics of habitat quality in Jilin Province from 2000 to 2024. [Results] ① From 2000 to 2024，the area of cultivated land，grassland and construction land increased continuously，while the area of woodland，water area and unused land decreased. ② From 2000 to 2024，the total value of ecosystem services showed a downward trend，among which forest ecosystem services value was the largest，and hydrological and climate regulation were the main ecological service functions. ③ The spatial distribution of habitat quality in Jilin Province was low in the central and western regions and high in the east. The quality of the habitat is deteriorating continuously，and the degradation is serious around the city and along the main river basins. [Conclusion] The habitat quality in the central and western regions of

收稿日期：2020-08-15 **修回日期**：2020-09-14

资助项目：国家自然科学基金项目“暴雨洪灾冲击下的松花江流域乡村脆弱性及韧性机制研究”(41977411)，“基于星—机—地多源遥感的湿地植物群落冠层氮素含量反演”(41771383)；吉林师范大学科研项目(研创新 201946)

第一作者：刘家福(1975—)，男(汉族)，吉林省敦化市人，博士，教授，硕士生导师，主要从事遥感与 GIS 在资源环境、自然灾害等领域的应用研究。Email：liujiafu750506@126.com。

Jilin Province has declined seriously, thus, more attention should be paid on the protection and rational utilization of city surrounding zones and water systems.

Keywords: land use; CA-Markov; ecosystem service value; InVEST model

土地是人类社会赖以生存发展的基础,是生态环境变化的主要驱动因素,生态系统是维持和稳定人类生存的自然环境条件,人类通过改变土地利用方式而影响生态系统服务[1]。土地资源在一定条件下产生的经济价值能为人类社会生活和发展提供福利,而人类为了追求社会进步与发展,不断地开发和改造土地资源,从而对区域生态系统造成日益严重的破坏与影响[2]。在国际组织积极号召与影响下,各国政府开始重视对生态系统的保护和开发,采取各种应对措施,越来越多的学者纷纷加入土地利用与生态系统的研究中[3]。目前我国部分地区生态系统服务呈现出不同程度的退化趋势,生态系统服务的退化是土地利用不合理的反映,若生态系统服务的功能得不到正常发挥,区域将难以实现可持续发展[4]。从目前国内外的文献成果看,学者们[5-7]对土地利用的研究,主要通过时空演变特征从多角度引入不同的方法分析其驱动机制;对生态系统服务研究主要是对物质量和价值量评价法的比较,根据不同的评价目的和评价空间尺度选择不同的评价方法[8-10]。国内外学者在 Costanza 等[11-14]研究成果的基础上不断改进评估方法,我国谢高地等人[11]于 2015 年通过模型运算和地理空间分析等方法又做了修正完善;虽取得大量研究成果,但对多时期土地利用变化、生态系统服务价值变化两者之间的时空耦合关联研究还需进一步深入加强。CA-Markov 模型可有效揭示未来土地利用在数量上的变化和空间上的演变趋势[15-17],InVEST 模型评估的生态系统服务功能演变使结果可视化[18-20]。吉林省位于中国东北地区中部,生态环境质量脆弱,受人类活动干扰频繁,分析与预测吉林省土地利用演变过程衡量对生态系统服务价值的影响程度,为吉林省生态环境保护与改善方针策略的制定提供借鉴依据。

1 研究区概况

吉林省地理位置位于 121°38′—131°19′E,40°50′—46°19′N 之间,位于我国东北地区中心位置,南邻辽宁省,北接黑龙江省,西与内蒙古自治区毗邻,并与俄罗斯和朝鲜两国接壤。地貌差异明显,东部以山地为主,平原分布在中西部地区,地势呈东南高、西北低的特征。境内河流众多,地跨图们江、鸭绿江、辽河、绥芬河、松花江水系。吉林省总面积 1.87×10^5 km^2,是我国重要的农、林、牧业生产基地。近年来区域开发与经济发展对生态环境造成严重破坏。

2 研究方法

2.1 数据来源与处理

吉林省 2000 和 2010 年数据来自于东北亚资源环境大数据中心(http://www.igadc.cn/)下东北亚地理科学数据中心的土地利用/土地覆被及其变化主题库,2017 年遥感影像数据下载于美国地质调查局(http://glovis.usgs.gov/),空间分辨率均为 30 m×30 m。对 2017 年遥感影像数据运用 ENVI5.3 软件建立图像解译标志的基础上,采用目视解译法提取各个土地利用类型。利用 ArcGIS 10.3 软件 Arc-Toolbox 中 spatial Analyst 工具,按掩膜提取出研究区的数据。由于数据获取路径不同,需要将数据进行归一化标准处理,所有数据都经过投影转换与重采样,地理坐标均采用 Xian_1980_3_Degree_GK_Zone_43。土地类型分类参考我国国土资源部最新修定的《土地利用现状分类标准(GB/T21010-2007)》标准,并综合吉林省土地利用发展程度和当地的生态种类以及分类标准体系,将吉林省土地利用分为 6 种类型,即:建设用地、草地、水域、林地、耕地和未利用土地。

2.2 CA-Markov 模型

CA-Markov 模型是元胞自动机(cellular automata,CA)模型和马尔可夫(Markov)模型的结合[17],用来模拟预测未来土地利用格局,不仅提高了土地利用预测在数量上的精确度,而且也有效地模拟了其在结构上的空间演化趋势,更具有实用性和科学性。具体方法为:①确定转换规则。将 ArcGIS 和 Markov 中生成的转移矩阵作为转换规则。②创建适宜性图集。用 IDRISI 软件中的 MCE 模块制作土地利用适宜性图集。③确定滤波器和迭代次数。CA 滤波器采用常用的 5×5 滤波器,迭代次数设置为 7,预测吉林省 2024 年土地利用空间分布格局(附图 6—7)。

2.3 生态系统服务价值评估

参照谢高地等人最新完善的生态系统服务价值当量因子表,耕地采用农田的指标,林地采用森林的指标,未利用土地采用荒漠的指标,依据当量因子表假定建设用地在生态系统服务中无价值,即服务价值为 0[4,11,21],确定研究区各土地利用类型生态系统服务价值(表 1),基于生态系统服务价值系数法进行定量评估[22],计算公式为:

$$ESV=\sum A_k \cdot V_k \quad (1)$$

式中:ESV 为生态系统类型服务总价值(亿元);A_k 为第 k 种生态系统类型的面积(km^2);V_k 为第 k 种生态系统类型的服务价值系数(元/km^2)。

$$ESV_f=\sum A_k \cdot V_{fk} \quad (2)$$

式中:ESV_f 为生态系统服务功能的总价值(亿元);V_{fk} 为第 k 种生态系统类型所对应的第 f 类服务功能的价值系数(元/km^2)。

表 1　土地利用类型生态系统服务价值　　元/km^2

生态系统类型		农田	森林	草地	水域	荒漠	合计
供给服务	食物生产	221	101	70	131	1	524
	原料生产	49	232	103	73	3	460
	水资源供给	−261	120	57	1304	2	1 222
调节服务	气体调节	178	763	362	285	13	1 601
	气候调节	93	2 283	858	643	10	3 887
	净化环境	27	669	316	931	41	1 984
	水文调节	299	1 494	701	13 360	24	15 878
支持服务	土壤保持	104	929	441	324	15	1 813
	维持养分循环	31	71	34	25	1	162
	生物多样性	34	846	401	1043	14	2 338
文化服务	美学景观	15	371	177	671	6	1 240
合 计		790	7 879	3 520	18 790	130	31 109

2.4　InVEST 模型

InVEST 模型中的生境质量(habitat quality)是衡量生态系统为生物种群和个体生存繁衍提供适宜条件能力的大小[23]。生境质量的大小取决于人类对土地的开发利用强度和威胁因子对这些土地利用类型的影响距离[23-25]。在 InVEST 模型中,距离越远影响越小,距离越近影响越大,生境质量模块称这种影响方式为衰减相关性,呈线性相关性用 1 表示,呈指数相关性用 0 表示[26]。计算公式为:

$$i_{rxy}=1-\left(\frac{d_{xy}}{d_{r\max}}\right) \quad (3)$$

$$i_{rxy}=\exp\left[-\left(\frac{2.99}{d_{r\max}}\right)d_{xy}\right] \quad (4)$$

式中:i_{rxy} 代表地类 y 中威胁因子 r 对地类 x 的影响程度;d_{xy} 代表地类 x 与地类 y 间的线性距离;$d_{r\max}$ 则为威胁因子 r 空间上的最大胁迫距离。

通过野外实地调查及大量相关文献的研究成果,结合吉林省数据的可获取性和社会经济的发展水平,确定研究区生境威胁因子包括耕地、建设用地和未利用土地。对威胁因子最大影响距离、权重和各威胁因子敏感度的设置,参考相关研究成果[17,19-20,24,26],参数设置如表 2—3 所示。

生境质量不仅能反映研究区内土地利用类型的破碎化程度,也能反映各土地利用类型对抵御威胁因子产生的生境退化能力的大小。在 InVEST 模型中,生境质量越高,土地开发利用强度越弱,值越接近 1。生境质量的计算公式为:

$$Q_{xj}=H_j\left[1-\left(D_{xj}^z/D_{xj}^z+k^z\right)\right] \quad (5)$$

式中:Q_{xj} 是土地利用 j 中栅格 x 的生境质量;D_{xj} 是土地利用 j 中栅格 x 的生境退化度;k 是为半饱——和常数,为栅格单元大小尺度值的 1/2;z 为归一化指数,取值 2.5;H_j 为土地利用 j 的生境适宜性,当 $H_j=0$ 时,$Q_{xj}=0$。

表 2　吉林省生态威胁因子参数

威胁因子	最大影响距离/km	权重	衰减线性相关性
耕 地	0.5	0.5	0
建设用地	2.0	0.7	1
未利用土地	1.0	0.3	0

表 3　吉林省生境类型对生态威胁因子敏感度

生境类型	自然属性	耕地	建设用地	未利用土地
耕 地	0	0	0.8	0.3
林 地	1	0.5	0.5	0.2
草 地	1	0.3	0.5	0.4
水 域	1	1	0.4	0.5
建设用地	0	0	0	0.6
未利用土地	0	0.5	0.2	0

为了更好地分析土地利用变化对研究区生境质量的影响,采取几何间隔法对生境质量值进行等级划分,结果详见表 4。

表 4 研究区生境质量分级

分值标准	生境质量等级	等级特征
0～0.2	差 等	生态适宜性差,环境受外界的干扰大,自然恢复能力差。
0.2～0.4	较差等	生态适宜性较差,容易受威胁因子的影响,自然恢复能力一般。
0.4～0.6	中 等	生态环境受外界干扰后有一定的恢复能力。
0.6～0.8	良 好	生态环境抵御威胁因子能力较强,植被覆盖率高。
0.8～1	优 等	生态适宜性良好,抵御威胁因子能力强,生物群落密集。

3 结果与分析

3.1 模型精度检验

检验 CA-Markov 模型常采用逐点对比或随机验证的方法,随机验证一般适用于大范围模拟,逐点对比法适合用于研究区面积相对小的区域,kappa 指数常用来比较两个图像的相似性。在 ArcGIS 软件中同时将 2017 年模拟预测与实际解译的土地利用数据加载对比分析,统计各类土地利用模拟预测面积和实际面积,计算得到各类型土地 kappa 指数,最后统计得到总体 kappa 指数为 83.11%,模拟效果较好,满足研究需要。

3.2 吉林省 2000－2017 年土地利用特征及分析

利用 ArcGIS 10.3 软件分别统计 2000,2010 和 2017 各类型土地面积和所占比例,结合附图 6—7 可知,吉林省土地利用类型在 2000—2010 年 10 a 间变化十分明显,其中耕地、林地、水域、建设用地都呈增长趋势,耕地面积由 73 619 km^2 增加到 79 679 km^2,增加了6 060 km^2;林地面积由 82 814 km^2 增加到 83 280 km^2,增加了 466 km^2;水域面积由 4 535 km^2 增加到7 177 km^2,增加了 2 642 km^2;建设用地面积由 6 475 km^2增加到 7 487 km^2,增加了 1 012 km^2。草地和未利用土地面积呈下降趋势,草地面积由 7 629 km^2 减少到 6 729 km^2,减少了 900 km^2;未利用土地面积由11 175 km^2 减少到 2 040 km^2,减少了 9 135 km^2。吉林省在 2010—2017 年这 7 a 间,土地利用类型的变化与前 10 a 的变化有很大差异,只有耕地、建设用地和未利用土地的变化趋势与前 10 a 一致,耕地面积持续增加,增加到 82 945 km^2,与 2010 年相比,增加幅度虽有所下降,但也增加了 3 266 km^2;建设用地面积增加到 7 940 km^2,增加了 453 km^2,但增幅没有前 10 a大;未利用土地面积也持续减少,已经减少到 1 743 km^2,减少了 297 km^2。与前 10 a 不同的是,林地和水域的面积呈下降趋势,草地呈增长趋势,林地面积由83 280 km^2 减少到 77 211 km^2,减少了 6 069 km^2;水域面积由 7 177 km^2 减少到 2 629 km^2,减少了 4 548 km^2;草地面积由 6 729 km^2 增加到 13 779 km^2,增加了 7 050 km^2。总体来看,吉林省土地利用从 2000—2017 年 17 a 间变化很大,耕地面积一直在上升,从 2000—2017 年增加了 9 326 km^2,这主要是由于人口的增长导致对粮食的需求增加,进而加大了对湿地和未利用土地的开发利用强度;林地从 2000—2017 年受人类破坏减少了 5 603 km^2;草地近年来受国家政策的保护面积也呈不断增加趋势,增加了 6 150 km^2;水域从 2000—2017 年减少了 1 906 km^2;建设用地受社会经济发展带动,居民及工矿用地大多数在原有居民点的基础上进行扩张,增加了 1 465 km^2;未利用土地多分布在西部,面积越来越小,到 2017 年仅剩 1 743 km^2,从 2000—2017 年 17 a 间减少了 9 432 km^2,被开发成了耕地和草地,这主要得益于吉林省多年以来在未利用土地中盐碱地的治理投入上。

3.3 吉林省 2024 年土地利用格局模拟与预测

由附图 6—7 和转移矩阵(表 5—6)可知,到 2024 年吉林省耕地、草地和建设用地面积持续增加,耕地达到 83 655 km^2;草地将是 2000 年的 2 倍,增加到 17 990 km^2;建设用地达到 7 977 km^2;林地变化相对比较稳定,相比 2017 年减少了 4 099 km^2;水域按照 2010—2017 年的变化趋势,仅剩 1 109 km^2,这对维护研究区生态平衡构成严重威胁;未利用土地仅剩 2 405 km^2。

表 5 吉林省 2010－2017 年土地利用转移概率矩阵

土地利用类型		2017 年面积					
		建设用地	草地	水域	林地	耕地	未利用土地
2010 年面积	建设用地	0.271 3	0.106 3	0.001 6	0.032 4	0.570 0	0.018 5
	草 地	0.083 8	0.410 7	0.005 7	0.026 3	0.388 2	0.085 3
	水 域	0.063 4	0.177 0	0.299 8	0.072 9	0.352 2	0.034 6
	林 地	0.007 9	0.162 4	0.001 3	0.542 2	0.285 6	0.000 6
	耕 地	0.058 3	0.301 9	0.004 4	0.122 6	0.501 0	0.011 8
	未利用土地	0.079 4	0.474 4	0.034 4	0.052 2	0.117 8	0.241 7

表 6　吉林省 2017—2024 年土地利用转移面积矩阵　　km^2

土地类型		2024 年面积						总计
		建设用地	草地	水域	林地	耕地	未利用土地	
2017 年面积	建设用地	6 665.20	848.24	161.93	0	229.53	71.79	7 976.69
	草 地	20.18	10 092.55	378.54	2 561.10	4 789.24	148.79	17 990.40
	水 域	0	0	1 108.89	0	0	0	1 108.89
	林 地	7.22	43.44	132.17	72 817.63	84.81	26.33	73 111.60
	耕 地	1 238.85	1 988.36	788.13	1 832.75	77 806.89	0.02	83 655.00
	未利用土地	8.96	806.26	58.84	0	34.90	1 496.21	2 405.17
	总 计	7 940.41	13 778.85	2 628.50	77 211.48	82 945.37	1 743.14	18 6247.75

3.4　2000—2024 年生态系统服务价值变化分析

由表 7 可知,吉林省 2000—2024 年各生态系统类型服务价值在总体层面上呈下降趋势,从 8.24×10^8 元降到 7.26×10^8 元。其中 2000—2010 年略微有所增加,增加了 5.40×10^7 元,2010—2024 年趋于下降,2010—2017 年减少了 1.06×10^8 元,2017—2024 年减少了 4.60×10^7 元。生态系统类型中森林的服务价值贡献量最大,4 个时期分别占 79.13%,74.61%,78.75%和 79.34%;荒漠的服务价值贡献量最小,占 0.12%～0.41%之间。2000—2024 年水域的服务价值变化率最大,减少了 7.43%;其次是草地,24 a 间增加了 4.89%;荒漠的变化率最小。

表 7　吉林省 2000—2024 年各类型的生态系统服务价值及比例

生态系统类型	2000 年		2010 年		2017 年		2024 年		2000—2024 变化率/%
	价值/10^8 元	比例/%	价值/10^8 元	比例/%	价值/10^8 元	比例/%	价值/10^8 元	比例/%	
农田	0.58	7.05	0.63	7.16	0.65	8.42	0.66	9.09	2.04
森林	6.52	79.13	6.56	74.61	6.08	78.75	5.76	79.34	0.21
草地	0.27	3.38	0.24	2.63	0.48	6.22	0.60	8.27	4.89
水域	0.85	10.32	1.35	15.36	0.49	6.35	0.21	2.89	−7.43
荒漠	0.01	0.12	0.03	0.24	0.02	0.26	0.03	0.41	0.19
总计	8.24	100	8.78	100	7.72	100	7.26	100	0

由表 8 可看出,在 11 种单项生态服务功能中,2000 和 2010 年水文调节服务价值最大,分别为 2.12 和 2.49 亿元,所占贡献率在 25.73%～28.46%;而 2017 和 2024 年气候调节的服务价值最大,分别为 1.98和 1.91 亿元,贡献率在 25.65%～26.31%。其次是土壤保持、生物多样性和气体调节,上述 5 种单项生态服务功能价值构成了吉林省生态系统服务价值的主体。此外,水资源供给和维持养分循环的价值贡献率较小,其中水资源供给贡献率成负值,维持养分循环贡献率在 1.03%～1.17%。

3.5　吉林省 2000—2024 年生态系统服务功能的评估

从吉林省 2000—2024 年生境退化度状况(附图 8—9)可知,吉林省整体生境质量一般,质量良好和优等区的面积在 2000—2010 年小幅度增加,在 2010—2017 年又小幅度减少,在 2017—2024 年将会呈现继续减少的趋势;质量中等区的面积总和在研究期间几乎没变;质量较差区的面积在 2000—2024 年持续增加;质量差区的面积在前 10 a 略有减少,在 2010—2017 年开始增加;在 2017—2024 年将会呈现继续增加的趋势,这表明吉林省的生境质量在不断下降。从空间格局看,吉林省生境质量在空间分布上呈中西部低,东部高的特征。质量优等区主要分布在东部山地地区,该地带以林地为主,生态环境保护良好,生物多样性丰富;质量良好区分布在吉林省西部草地区和质量优等区的周边,生态环境遭受破坏程度不大;质量中等区的分布与河流具有很大的相关性,沿河岸受人类活动影响,破坏生物多样性;质量较差区分布在以建设用地为主的城市周边和未利用土地区;由于地形、气候和人为干扰原因,生境质量差区集中连片分布在吉林省以耕地为主的中西部地区,分布有大量的居民点。

生境退化度是生境质量下降程度的反映。从图 1 可知,吉林省的城市附近和各大水系流域沿岸生境退化最严重,城市扩张建设用地占据耕地和林草地,对生态环境造成严重的破坏;以耕地为主的中西部地区,农村居民点较多,受人类活动影响严重,生态环境遭到破坏生境退化度较高;以林地为主的东部,生境退化不是很明显。

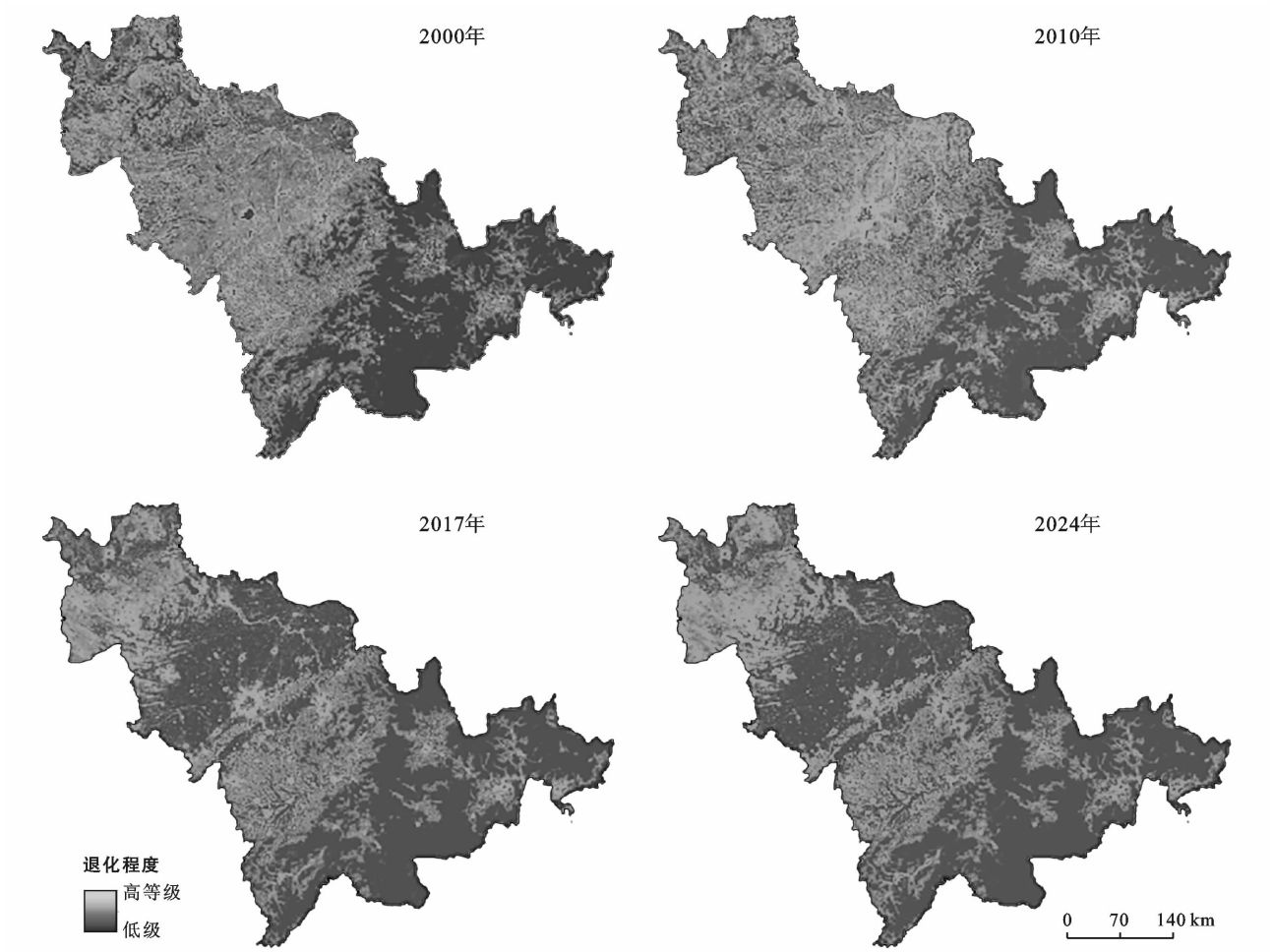


图 1 吉林省 2000—2024 年生境退化度状况

表 8 吉林省 2000—2024 年单项生态系统服务价值 10^8 元/a

服务功能		2000 年	2010 年	2017 年	2024 年
供给服务	食物生产	0.26	0.27	0.27	0.27
	原料生产	0.24	0.24	0.24	0.23
	水资源供给	−0.03	−0.01	−0.08	−0.11
调节服务	气体调节	0.80	0.82	0.79	0.78
	气候调节	2.05	2.08	1.98	1.91
	净化环境	0.64	0.67	0.61	0.58
	水文调节	2.12	2.49	1.85	1.62
支持服务	土壤保持	0.90	0.91	0.87	0.85
	维持养分循环	0.09	0.09	0.09	0.08
	生物多样性	0.81	0.83	0.76	0.73
文化服务	美学景观	0.36	0.38	0.34	0.32
	合 计	8.24	8.78	7.72	7.26

4 结 论

(1) 2000—2024 年,吉林省长期以来对未利用土地治理与草地保护已显现成效,未利用土地面积有所减少,草地面积增加,但仍有较大面积的林地和水域减少,表明林地和水资源呈现边保护边破坏的局面;耕地和建设用地面积持续增长,这种变化反映了研究区城镇的发展,过度开发土地变为耕地,政府应采取相应措施加以控制。

(2) 吉林省生态系统服务价值在 2000—2010 年有所增加,2010—2024 年趋于减少,整体呈下降趋势,其贡献量从大到小依次为森林、水域、农田、草地和荒漠。生境质量方面,2000—2010 年吉林省生境质量较为稳定,但 2010—2024 年呈现出下降趋势。吉林省中部及西部地区生境质量下降较为严重,应注重城市周边及水系的保护与合理利用。

(3) 获取数据来自不同的数据中心,因此在数据的解译分类过程中存在微小的标准规则差异,这就导致模型预测结果存在一定的误差和不确定性;InVEST模型中许多参数是参考前人研究成果基础上设置的,在后续研究中,应分别对各个参数进行量化研究。吉林省作为东北地区乃至全国生态价值的一部分,其生境退化直接影响土地利用结构的优化配置。

[参 考 文 献]

[1] 陈万旭,李江风,曾杰,等. 中国土地利用变化生态环境效应的空间分异性与形成机理[J]. 地理研究,2019,38(9):2173-2187.

[2] 薛嵩嵩,高凡,何兵,等. 近 30 年乌伦古河流域土地利用与生态系统服务价值变化研究[J]. 水土保持通报,2019,39(6):223-229.

[3] 肖建设,乔斌,陈国茜,等. 黄河源区玛多县土地利用和生态系统服务价值的演变[J]. 生态学报,2020,40(2):510-521.

[4] 管青春,郝晋珉,石雪洁,等. 中国生态用地及生态系统服务价值变化研究[J]. 自然资源学报,2018,33(2):195-207.

[5] 柳冬青,张金茜,巩杰,等. 陇中黄土丘陵区土地利用强度—生态系统服务—人类福祉时空关系研究:以安定区为例[J]. 生态学报,2019,39(2):637-648.

[6] 朱治州,钟业喜. 长江三角洲城市群土地利用及其生态系统服务价值时空演变研究[J]. 长江流域资源与环境,2019,28(7):1520-1530.

[7] 刘春芳,王川. 基于土地利用变化的黄土丘陵区生境质量时空演变特征:以榆中县为例[J]. 生态学报,2018,38(20):7300-7311.

[8] 苏慧,张仲伍,张兴毅,等. 中部地区生态经济系统协调度的时空演化[J]. 水土保持通报,2019,39(4):288-293.

[9] Meng L, Dong J. LUCC and ecosystem service value assessment for wetlands: A case study in Nansi Lake, China [J]. Water, 2019,11(8):1597-1615.

[10] Keyue Y, Fei L, Haijuan Y, et al. The influence of land use change on ecosystem service value in Shangzhou District [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, 16(8): 1321-1334.

[11] 谢高地,张彩霞,张雷明,等. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J]. 自然资源学报,2015,30(8):1243-1254.

[12] Guan Dongjie, Zhao Zulun, Tan Jing. Dynamic simulation of land use change based on logistic-CA-Markov and WLC-CA-Markov models: A case study in Three Gorges Reservoir area of Chongqing, China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26(20):20669-20688.

[13] Zhao Minmin, He Zhibin, Du Jun, et al. Assessing the effects of ecological engineering on carbon storage by linking the CA-Markov and InVEST models [J]. Ecological Indicators, 2019,98:29-38.

[14] Chu Lin, Sun Tiancheng, Wang Tianwei, et al. Evolution and prediction of landscape pattern and habitat quality based on CA-Markov and InVEST model in Hubei section of Three Gorges Reservoir area(TGRA) [J]. Sustainability, 2018, 10(11): 3854-3882.

[15] 褚琳,张欣然,王天巍,等. 基于 CA-Markov 和 InVEST 模型的城市景观格局与生境质量时空演变及预测[J]. 应用生态学报,2018,29(12):4106-4118.

[16] 黄康,戴文远,黄万里,等. 基于 CA-Markov 和 InVEST 模型的土地利用变化对生境影响评价:以福建省福州新区为例[J]. 水土保持通报,2019,39(6):155-162.

[17] 吴季秋. 基于 CA-Markov 和 InVEST 模型的海南八门湾海湾生态综合评价[D]. 海南 海口:海南大学,2012.

[18] 杨志鹏,许嘉巍,冯兴华,等. 基于 InVEST 模型的东北地区土地利用变化对生境的影响研究[J]. 生态科学,2018,37(6):139-147.

[19] 巩杰,马学成,张玲玲,等. 基于 InVEST 模型的甘肃白龙江流域生境质量时空分异[J]. 水土保持研究,2018,25(3):191-196.

[20] 陈珊珊,臧淑英,孙丽. 基于 InVEST 模型的土地利用变化对生境质量的影响研究:以松嫩平原为例[J]. 中国农学通报,2020,36(3):74-80.

[21] 董会忠,姚孟超. 成渝经济区土地利用变化对生态系统服务价值的影响[J]. 水土保持通报,2020,40(1):213-220.

[22] Costanza R, Arge, Groot R D, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. Nature, 1997,387(15):253-260.

[23] Gong Jie, Xie Yuchu, Cao Erjia, et al. Integration of InVEST-habitat quality model with landscape pattern indexes to assess mountain plant biodiversity change: A case study of Bailongjiang watershed in Gansu Province [J]. Journal of Geographical Sciences, 2019, 29(7): 1193-1210.

[24] 张文静,孙小银,单瑞峰. 基于 InVEST 模型研究山东半岛沿海地区土地利用变化及其对生境质量的影响[J]. 环境生态学,2019,1(5):15-23.

[25] 姚云长. 基于 InVEST 模型的三江平原生境质量评价与动态分析[D]. 吉林 长春:中国科学院大学(中国科学院东北地理与农业生态研究所),2017.

[26] 朱鹏飞. 基于 InVEST 模型的广西沿海地区土地利用/覆被变化的生态效应研究[D]. 广西 桂林:广西师范学院, 2018.