

基于 Logistic-CA-Markov 与 InVEST 模型对南京市土地利用与生物多样性功能模拟评价

荣月静¹, 张 慧^{1,2}, 王岩松³

(1. 环境保护部 南京环境科学研究所, 南京 210042; 2. 南京信息工程大学

大气环境与装备技术协同创新中心, 南京 210044; 3. 辽宁省环境科学研究院, 沈阳 110015)

摘 要:针对目前国际上应用比较广泛的 Logistic 模型,在此基础上加入空间自相关变量,应用 1985 年、1995 年、2005 年、2015 年 4 期土地利用数据,再结合 CA-Markov 模型模拟预测了南京市 2025 年 3 种不同情景(自然增长情景、生态保护情景和土地优化情景)下的土地利用发展方向;进一步结合 InVEST 模型,研究以上 4 年土地利用变化下的生物多样性服务功能分布和变化,以及 2025 年不同模拟情景下的生物多样性服务功能分布情况。结果表明:Logistic-CA-Markov 模型精度 Kappa 值均在 0.80 以上,预测效果较好。在不同的情景设置下,土地利用存在明显的空间差异:自然增长情景按原有速率变化,则建设用地快速发展并占用大量耕地,生物多样性受到严重威胁,生态保护情景和土地优化情景对未来土地调控效果较好,生物多样性功能得到很好改善,可以为当地土地利用总体规划提供科学决策参考。

关键词:Logistic-CA-Markov 模型; InVEST 模型; 生物多样性

中图分类号:F301.24

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2016)03-0082-08

Assessment on Land Use and Biodiversity in Nanjing City Based on Logistic-CA-Markov and InVEST Model

RONG Yuejing¹, ZHANG Hui^{1,2}, WANG Yansong³

(1. *Nanjing Institute of Environmental Science, MEP, Nanjing 210042, China*; 2. *Collaborative Innovation*

Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology (CICAEET), Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 3. *Liaoning Academy of Environmental Research, Shenyang 110015, China*)

Abstract: Adopting the international widely used model; logistic model jointing the autocorrelation on the basis of traditional Logistic binary regression, and combining the CA-Markov model based on land use data of 1985, 1995, 2005 and 2015, the land use changes of three different scenarios (natural growth situation, ecological protection and land optimization scenario) of Nanjing City in 2025 were predicted, we further used InVEST model to examine the distribution of biodiversity service function and change under the land use changes in 1985, 1995, 2005, 2015, and the distribution of biodiversity service function of year 2025. The results showed that Logistic-CA-Markov regression model Kappa value was greater than 0.80, it was a good prediction effect. There was the obvious spatial difference of land use in the different scenarios, in natural growth situation, the construction land increased rapidly according to the original rate, farm land took up seriously, the overall environment quality reduced seriously, habitat degradation was obvious. Ecological protection and land optimization scenarios for the future land control effect are good, the biodiversity service function is improved, it can provide scientific decision-making reference for the local land use planning.

Keywords: Logistic-CA-Markov model; InVEST model; biodiversity

土地利用的变化时刻改变着区域乃至全球生态环境的变化,土地利用结构的变化对区域景观格局有

重要的影响,并直接影响区域土地利用系统与生态系统之间的关系。当前,土地利用变化可以通过多种模

型模拟,其中地理学具有代表性的就是以元胞自动机预测土地利用变化的模型。在国外元胞自动机模型从20世纪90年代广泛应用于景观生态学中^[1-3],GIS技术不断推动元胞自动机模型在城市模拟中的应用^[4-6]。在国内孙贤斌等^[7]采用CA-Markov模型方法,研究挠力河流域不同时段土地利用对湿地干扰的程度,得到由于土地大规模开发,景观格局发生巨大变化,致使湿地景观大量丧失;黎夏等^[8]首次将CA模型与逻辑回归、主成分分析与神经网络等结合进行城市扩张模拟,模拟结果良好,对城市规划提供科学的决策参考;何春阳等^[9]基于CA和经济学Tietnebegr模型构建了一个模拟和预测大都市区城市发展演变过程的城市扩展模型。赵建军等^[10]采用CA-Markov模型,运用1988年、1996年、2003年3期土地利用数据,结合海拔、交通、气候等驱动因子,预测向海保护区2010年、2018年的土地覆被类型,得到保护区湿地面积在大量减少,森林和草地呈减少趋势,耕地、居民地、未利用地呈增加趋势,其中未利用地面积增加最多。

土地利用变化后,将使生态系统组成发生改变,从而使生态系统多样性发生变化。国外Forster等^[11]从短期(5~10 a)和长期(10 a以上)尺度上分别研究英国加勒比海洋和沿海地区由于海鸥或海龟引起的生境损失、物种侵袭、资源的不可持续利用和珊瑚礁的破坏等生态环境问题。Rojas等^[12]通过分析拉丁美洲2000—2010年影响土地利用的地理要素,来分析城市化影响土地利用变化,人造林、森林采伐、农业废弃对生物多样性造成压力,结果对拉丁美洲战略环评和可持续管理提供参考。Billionnet^[13]运用数学优化方法研究针对景观破碎化、森林开发、入侵物种控制以及遗传多样性的维护等生物多样性方面的保护。Corona等^[14]基于森林资源数据,来研究植物物种丰富度、树种类等,进而通过森林资源潜力来评估景观多样性指标。Barbati等^[15]通过对欧洲森林监测,得到2000—2010年欧洲森林面积显著增加,但是森林生境和森林类型损失严重,从而研究森林可持续管理。杨德伟等^[16]2006年基于景观生态学的理论对生物多样性进行研究,指出要深入分析生物多样性,就得研究所依存的区域生态系统的结构和功能,尤其是它的富集区(如湿地、沼泽地等),这样才能达到其有效保护和景观的优化利用。刘振生等^[17]2013年运用MAXENT模型对贺兰山岩羊生境适宜性进行研究,得出岩羊偏爱于山势陡峭地带,并建议减少矿区和道路等人为干扰因素,以此来提高岩羊的生境质量。

南京市位于长江下游中部富庶地区,江苏省西南部。南京地处长江下游的宁镇丘陵山区,位于北纬 $31^{\circ}14'—32^{\circ}37'$,东经 $118^{\circ}22'—119^{\circ}14'$,总面积 $6\,579\text{ km}^2$ 。属亚热带季风气候,四季分明,地形复杂,近30年土地利用类型发生了很大的变化,因此本文将南京市作为研究区域,运用前人的经验,并加以创新,将Logistic-CA-Markov土地利用预测模型与生态服务功能软件InVEST模型中的生物多样性模型结合,深入探讨土地利用变化对生物多样性影响的原因,提出土地优化的方案。

1 数据处理与研究方法

1.1 数据来源与处理

本文主要数据源,分别来源于1985年、1995年、2005年和2015年4个时期的Landsat TM/ETM和MODIS数据影像,分辨率为30 m,遥感数据整体质量较好,没有大范围云系覆盖,地物信息丰富,为区域的景观格局研究提供了充足的信息来源。数据处理平台包括ENVI 5.0, ArcGIS 10.0, IDRISI 软件。通过进行人机交互解译的方法,对不同土地类型进行监督分类,得到南京市土地利用图。以《土地利用现状分类》标准为基础,将南京市土地利用类型分为6大类,即森林、草地、湿地、耕地、建设用地和未利用地。由于元胞的大小会直接影响模型模拟的精度以及模型的运算时间,并且研究区范围较大,因此将元胞的大小确定为 $100\text{ m}\times 100\text{ m}$ 。

1.2 研究模型与研究方法

1.2.1 Logistic回归模型 Logistic回归模型^[19]主要进行二分类或多分类因子变量分析,目前被广泛应用于土地利用变化驱动力的研究中。Logistic回归模型的方程为:

$$\lg\left(\frac{P_i}{1-P_i}\right)=\beta_0+\beta_1X_1+\beta_2X_2+\cdots+\beta_nX_n \quad (1)$$

式中: P_i ——每个栅格可能出现某一土地利用类型*i*的概率; X_n ——各影响因子; β_0 ——常数项; β_i ——Logistic回归的偏回归系数。Logistic回归模型可以对每一个栅格出现某一地类的概率进行诊断,筛选出对土地利用类型格局影响较为显著的因素,并确定它们间的定量关系和作用大小,通常可用ROC方法进行检验。

1.2.2 CA模型与Markov过程的耦合 Markov与CA均为时间离散、状态离散的动力学模型。用Markov模型对土地利用变化进行预测,由于没有考虑各种土地利用类型的空间分布,所以得到的预测变化也只是在数量上的反映,无法反映在空间上的分布

变化情况。而 CA 模型具有空间概念,状态变量与空间位置紧密相连,能够模拟空间系统的复杂变化。在 Markov 模型分析的基础之上,加入具有空间模拟能力的 CA 模型,能够综合考虑各种因素的影响,同时考虑土地利用的历史变化趋势,对土地利用的变化进行动态模拟,以获取未来土地利用的状况。Markov 模型计算原理:

$$S_{t+1} = P_{ij} S_t \quad (2)$$

式中: S_t, S_{t+1} —— $t, t+1$ 时刻土地利用系统的状态; P_{ij} ——状态转移矩阵。

CA 模型只是一种建模框架,而不是具体的模拟模型,它由离散的元胞、元胞空间、有限的状态、领域和规则 5 部分构成。可描述如下:

$$S'_{t+1} = (U_d, S'_t, N_t, f) \quad (3)$$

式中: S'_{t+1} —— $t+1$ 时刻元胞状态; U_d —— d 维的元胞空间,即网格单元; S'_t —— t 时刻元胞状态; N_t —— t 时刻邻居的状态组合; f ——转换规则。

1.2.3 InVEST 模型—Biological 模块 生物多样性与生态服务功能直接相关,生物多样性的空间分布格局与土地利用及其威胁有很深的联系,InVEST 模型的生物多样性模型用栖息地的质量好坏代表生物多样性的持续性、恢复能力、广度和深度的变化,得到生境质量指数和退化指数,以达到平衡生物多样性和经济发展的需求。

Biodiversity 模型运行过程在 ArcGIS 中运行 InVEST 模型,按照模型自带参数设置情况在 InVEST Toolbox 下的 Biodiversity 模块中设置相应的数据。模型输出生境质量指数和生境退化度图层。

Habitat_{index} 为生境质量指数,采用生境质量指数评价:

$$Q_{xj} = H_j (1 - \frac{D_{xj}^2}{D_{xj}^2 + k^2}) \quad (4)$$

式中: Q_{xj} ——土地利用与土地覆盖 j 中栅格 x 的生境质量; H_j ——土地利用与土地覆盖 j 的生境适合性; k ——半饱和常数,当 $1 - \frac{D_{xj}^2}{D_{xj}^2 + k^2} = 0.5$ 时, k 值

等于 D 值。

D_{xj} 为土地利用与土地覆盖或生境类型 j 栅格 x 的生境胁迫水平,其计算公式如下:

$$D_{xj} = \sum_{r=1}^R \sum_{y=1}^{Y_r} (w_r / \sum_{r=1}^R w_r) r_y i_{rxy} \beta_x S_{jr} \quad (5)$$

栅格 y 中胁迫因子 r 对栅格 x 中生境的胁迫作用为 i_{rxy} :

$$i_{rxy} = \begin{cases} 1 - \left(\frac{d_{xy}}{d_{rmax}} \right) & \text{(线性)} \\ \exp \left(-2.99 \frac{d_{xy}}{d_{rmax}} \right) & \text{(指数)} \end{cases} \quad (6)$$

式中: d_{xy} ——栅格 x 与栅格 y 之间的直线距离; d_{rmax} ——胁迫因子 r 的最大影响距离; W_r ——胁迫因子的权重,表明某一胁迫因子对所有生境的相对破坏力; β_x ——栅格 x 的可达性水平,1 表示极容易达到; S_{jr} ——土地利用与土地覆盖(或生境类型) j 对胁迫因子 r 的敏感性,该值越接近 1 表示越敏感;

生境退化指数与生境中各地类距离生态威胁因子的远近空间位置关系、地类对于威胁因子的敏感程度以及威胁因子的数量等因素紧密相关。这主要是基于 InVEST 模型中这样的假设,即认为在一个生态系统中地类对于威胁因子的敏感性程度越高,则该威胁因子对地类退化程度的影响也就越大。生境退化程度的计算公式如下:

$$\text{生境退化指数} = \text{敏感性分布图层} \times \text{威胁强度分布图层} \times \text{权重值} \quad (7)$$

2 结果与分析

2.1 土地利用变化现状

2.1.1 土地利用结构分析 1985—2015 年各土地利用类型均发生着变化,主要表现为湿地、建设用地的增加,森林、草地和耕地的减少。建设用地增加幅度较大,从 1985 年的 9.68% 增加到 2015 年的 25.09%,湿地从 8.19% 增加到 14.80%;耕地降低幅度较大,耕地从 1985 年的 71.06% 减少到 2015 年的 51.48%,森林从 10.11% 减少到 8.54%,草地从 0.91% 减少到 0.10% (表 1)。

表 1 1985—2015 年南京市土地利用类型面积及比例

土地类型	1985 年		1995 年		2005 年		2015 年	
	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%
森林	667.10	10.11	695.92	10.55	656.93	9.96	563.10	8.54
草地	59.91	0.91	60.98	0.92	7.12	0.11	6.33	0.10
湿地	540.36	8.19	591.25	8.96	910.02	13.79	976.32	14.80
耕地	4687.61	71.06	4507.02	68.32	3801.35	57.62	3396.08	51.48
建设用地	638.76	9.68	740.72	11.23	1220.91	18.51	1654.89	25.09
未利用地	3.26	0.05	1.11	0.02	0.67	0.01	0.28	0.00
合计	6597.00	100.00	6597.00	100.00	6597.00	100.00	6597.00	100.00

2.1.2 土地利用转移分析 从表 2 可以得出,南京市 1985—2015 年耕地转化为建设用地的面积最大,为 1 150.47 km²,这表明南京市近 30 a 城市化进程飞速增长,其次是耕地转化为湿地 427.78 km²,建设用地转化为耕地 210.22 km²,森林转化为耕地 187.59 km²,耕地转化为森林 164.55 km²,森林转化

为建设用地 89.69 km²,这其中森林和耕地、森林和建设用地、耕地和建设用地相互转化,是由于 1985—2015 年前期南京市经济快速增长,土地需求量增多,大量森林和耕地被建设用地占用,后期南京市在发展经济的同时注重生态环境保护和恢复,进行大规模的植树造林所致。

表 2 南京市 1985—2015 年土地利用转移矩阵

生态系统	森林	草地	湿地	耕地	建设用地	未利用地	合计
森林	372.77	1.20	15.85	187.59	89.69	0.00	667.10
草地	2.45	0.91	41.88	6.94	7.73	0.00	59.91
湿地	4.27	0.13	458.31	48.57	29.08	0.00	540.36
耕地	164.55	3.52	427.78	2941.02	1150.47	0.28	4687.61
建设用地	21.02	0.44	30.88	210.22	376.21	0.00	638.76
未利用地	1.11	0.00	0.16	0.42	1.57	0.00	3.26
合计	566.17	6.20	974.85	3394.75	1654.75	0.28	6597.00

2.2 土地利用变化预测

2.2.1 土地利用变化驱动因子分析 总结已有的相关研究,根据研究区现状,选取人文、自然和可达性 3 个方面 16 个驱动因子(表 3),并且加入空间自相关因子,提取其栅格属性信息并导入到 IDRISI 软件的 Logistic 逐步回归模块,对南京市土地利用变化的相关驱动因子进行分析。并对所得结果进行 ROC 检验,筛选出对土地利用变化有显著影响的因子,进而分析其驱动机制,为元胞自动机提供转换规则。同时将耕地、森林、草地、水域、建设用地、未利用地与各驱动因子单

独成层,制成具有相同投影信息、相同分辨率、相同大小的栅格影像,并导出形成 ASCII 文件,输入 IDRISI 模型中 editor-collector 模块,在 IDRISI 的 Logistic 模块中,需要对所有的驱动因子和土地利用类型进行二值化处理。本研究结合以往学者研究,结合南京市实际情景,依据 17 个人文、自然、可达性驱动因子和自相关因子图,创建这些驱动因子的二值化图,即重分类为 0,1 值。最后计算得各地类 ROC 检验值均达到了 0.80 左右,表明 Logistic 回归模型对南京市土地利用类型的驱动因子的分析较为准确可信。

表 3 逻辑回归分析结果

驱动因子	森林	草地	湿地	耕地	建设用地	未利用地
常量	-1.4079	-3.9286	-4.3107	-3.5328	-3.6336	—
人口数量	-0.3487	-0.3518	0.2047	-0.1026	1.2672	—
地区生产总值	-0.3557	1.3921	-443.4731	1.4596	0.1695	—
第一产业增加值	0.6722	-0.2918	-3.6991	0.4290	0.44684	—
第二产业增加值	0.4096	0.2294	-0.4945	0.1130	-0.1464	—
第三产业增加值	0.0216	-0.3052	-0.8573	-0.3107	-0.2083	-11.3134
高程	-4.6184	5.8554	-0.9626	-4.8149	-1.0749	—
坡度	-19.9636	2.3068	2.0468	-15.3158	0.1772	—
坡向	2.4696	1.4698	1.0442	1.5720	1.1560	-11.3355
降雨量	-0.3500	0.5710	-0.5167	-0.3197	-0.4308	—
到主要湖泊的距离	-3.6522	-1.8171	-16.6704	7.4111	-2.9159	-11.2673
到主要河流的距离	-1.9706	-3.1584	0.7268	5.3534	-1.099	-10.6271
距国道的距离	0.86306	-0.3935	-29.749	0.0113	0.6298	-11.1502
距省道的距离	1.8694	0.1445	-0.5321	0.7312	0.4004	—
到高速公路的距离	1.6596	-0.0522	-0.9497	0.5961	0.4109	-10.8709
到主要铁路的距离	1.0857	0.3924	-0.2520	0.1009	0.3179	-11.1859
到主要城镇的距离	-1.9433	-0.7737	-1.7136	-1.5208	4.0670	-9.4803
Autovalue	-3.4578	-17.4596	-15.6279	-2.1593	3.6331	—
ROC 检验	0.8057	0.8042	0.8339	0.8681	0.8554	0.8025

2.2.2 Kappa 系数精度检验 模型模拟土地利用空间变化的精度进行检验通常采用 Kappa 指数方法:

$$Kappa = (P_o - P_c) / (P_p - P_c) \quad (8)$$

式中: P_o ——模拟正确的比例; P_c ——模型随机情况下模拟正确的比例; P_p ——理想分类情况下正确模拟的比例。

运用 IDRISI 软件中 GIS Analysis→Database Query→CROSSTAB, 1 表示第一幅影像数据, 这里的 2000 年为模拟产生的数据; 2 表示第二幅影像数据, 这里的 2000 年为实际数据。其实, 上述二者的顺序是可以调换的。如附图 11 所示, 模型运行后得出 2005 年和 2015 年的 kappa 系数结果为 0.82, 0.85, 模拟效果较好。

2.2.3 土地利用结构情景模拟分析 将通过精度验证的 CA-Markov 模型对南京市 2025 年的土地覆被类型进行模拟预测, 通过改变模型中转移矩阵的参数, 得到南京市 2025 年自然增长、生态保护和土地优化 3 种不同情景下的土地利用规划(表 4)。

在自然发展情景条件下, 南京市土地利用需求不会受到较大规模的政策调整的影响, 土地需求依然按照各地类 2005—2015 年的转移概率矩阵变化, 计算得到嘉兴市 2025 年的各地类的面积, 得到 2025 年耕地比 2015 年减少了 261.10 km², 耕地面积仅占南京市土地面积的 47.50%, 建设用地增加了 498.89 km², 建设用地将占南京市土地面积的 32.65% 左右。因此, 如果按照此模式发展, 建设面积将持续快速增长, 危及粮食安全, 是不可持续的。

在生态保护情景条件下, 要求在严格保护森林和水域两种生态用地面积的同时, 加强耕地和建设用地向这两种地类的转变。设置如下: 耕地到建设用地的转化概率由原来的 17.81% 下降到 12.81%, 转化率降低 5%; 建设用地到耕地的转化概率由原来的 10.42% 上升为 13.42%, 转化率上升 3%。此外, 耕地到森林的转化概率由原来的 0.41% 上升到 0.91%, 提高 0.5%, 建设用地到森林的转化概率提高 1%, 森林到建设用地的转化概率降低 2%, 水域到耕地转化概率降低 5%, 由 10.56% 降到 5.56%; 水域到建设用地的转化概率减少 2%; 得到 2025 年建设用地增加量显著减少, 耕地转化为建设用地比在自然增长情景下少增加

262.33 km²; 森林、湿地和耕地在 2015 年的基础上, 分别少减少了 45.15, 84.30, 132.85 km², 且水域面积也有一定增长, 因此, 如果按照此模式发展, 将增加生物多样性, 改善生态环境, 人与自然和谐发展。

在土地优化情景条件下, 综合考虑社会、经济 and 环境保护之间的相互利益, 引入生态系统的整体服务意识, 既不过分强调经济发展, 也不因为保护生态环境而止步不前, 要在实现 GDP 稳步增长的同时保住青山绿水。设置如下: 耕地到建设用地转化概率由原来的 17.81% 下降到 14.81%, 转化率降低 3%; 建设用地到耕地的转化概率由原来的 10.42% 上升为 12.42%, 转化率上升 2%。此外, 耕地到森林转化概率提高 0.1%, 建设用地到森林转化概率提高 2%。森林到建设用地的转化概率降低 1%, 水域到耕地转化概率降低 4%, 由 10.56% 降到 6.56%, 水域到建设用地的转化概率减少 1%; 得到 2025 年建设用地合理增加, 增加量为 319.33 km², 为自然增长量的 64.00%, 保证了工业生产的同时也为生态保护留下了足够空间。森林面积减少量为 67.64 km², 为自然减少量的 61.29%, 虽然小于生态保护情景, 但是对当地物种的保护和生存有巨大的促进作用。

2.3 生物多样性功能评价

2.3.1 威胁因子敏感度 生态系统中每一个土地利用类型受威胁的敏感度不同, 敏感度的大小主要是依据生态学和景观生态学的基本理论及保护生物多样性的基本原则来确定的。本文查阅相关文献, 依据 InVEST 2.6.5 Beta User's Guide 中生态威胁因子划分标准, 结合南京市的生态环境实际情况, 在生物多样性模型中将各土地利用类型划分森林、草地、湿地、耕地、建设用地和未利用地, 同时威胁因子敏感度的取值范围取 0~1, 并且依照生态学和景观生态学中生物多样性保护的一般性要求, 认为森林、草地和湿地等天然地类敏感度较高, 耕地、建设用地等人工地类敏感度较低, 未利用地敏感度最低。对于各土地利用类型自然属性(Habitat)一系列的赋值是依据森林、草地和湿地均为生境地类, 耕地、建设用地和未利用地为非生境地类而确定的, 故将天然地类和人工地类分别赋值为 1, 0, 具体如表 5 所示。

表 4 南京市 2025 年不同情景土地利用变化

km²

年份	情景设置	森林	草地	湿地	耕地	建设用地	未利用地
2015	实际土地利用	563.1	6.33	976.32	3396.08	1654.89	0.28
	自然发展情景	452.74	7.76	847.59	3134.98	2153.78	0.16
	生态保护情景	497.89	7.77	931.89	3267.83	1891.45	0.16
	土地优化情景	495.46	7.76	914.15	3205.24	1974.22	0.16
2025	自然发展面积变化	-110.36	1.43	-128.73	-261.10	498.89	-0.12
	生态保护面积变化	-65.21	1.44	-44.43	-128.25	236.56	-0.12
	土地优化面积变化	-67.64	1.43	-62.17	-190.84	319.33	-0.12

表 5 生境类型对生态威胁因子敏感度

土地利用类型	HABITAT	L_crp	L_nr	L_pr	L_railway	L_urban	L_highway	L_industry
森林	1.00	0.50	0.50	0.50	0.50	0.55	0.50	0.70
草地	1.00	0.30	0.30	0.30	0.30	0.35	0.30	0.50
湿地	1.00	0.70	0.70	0.70	0.70	0.75	0.70	0.90
耕地	0.00	0.30	0.30	0.30	0.30	0.35	0.30	0.50
建设用地	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
未利用地	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

注: Habitat: 自然属性; L_crp: 耕地; L_nr: 国道; L_pr: 省道; L_railway: 铁路; L_urban: 城镇; L_highway: 高速公路; L_industry: 工业用地。

2.3.2 威胁因子图层 对生物多样性造成威胁的图层包括耕地、城镇、工业用地、铁路、高速公路、国道和省道等因子,查阅相关文献的研究分析,考虑研究区内城镇交通工具限制和经济发展水平,并参照 InVEST 2.6.5 Beta User's Guide 中研究成果,定义威胁因子的最大影响距离、权重及衰退线性相关性指数,具体如表 6 所示。

表 6 生态威胁因子属性

威胁因子	最大影响 距离/km	权重	衰退线性 相关性
耕地(水田、旱地)	0.50	0.50	0.00
城镇居民点	2.00	0.70	0.00
工业用地	1.00	1.00	0.00
铁路	0.50	0.50	1.00
高速公路	0.50	0.50	1.00
国道	2.00	1.00	1.00
省道	1.00	0.70	1.00

2.3.3 保护程度图层 国家级自然保护区、森林公园、湿地公园等受到法律保护,地类的转化和保护与否不以个人的意志为转移,模型将其赋值为 1。在本文中所提的法律保护程度表示的是在当前的各项政策、法律、法规、条例及其实施办法下,对于该地类的生态环境保护程度。

本文参照 InVEST 模型的设置办法来设置保护程度等级分值,研究区域内的自然保护区、自然与人文风景名胜区域、地质公园等保护程度要高,如止马岭保护区、石臼湖(溧水区)风景名胜、汤山国家地质公园设为 1;水源水质保护区域、湿地保护区域设为 0.8,如三岔水库饮用水水源保护区、中山水库一方便水库饮用水源保护区、南京固城湖省级湿地公园等;剩余的小片森林和草丛的地类,属于既无人保护也无人管理的地类,设为 0.2。本文以 1985 年土地利用类型矢量为基准,在其属性表对应地类中设置保护性程度等级分值,再导出矢量层,得到保护程度因子层。

2.3.4 生物多样性时空分布

(1) 生境质量指数。如表 7 所示,将生境质量指数分为 0,0~0.5,0.5~0.7,0.7~0.9,0.9~1 共 5 个等级。其中生境质量指数为 0 的比例最大,为 75%以上,其次

是 0.9~1 的,比例占 18%以上,其他比例较小;南京市生境质量指数为 0 的比例降低,从 1985 年的 80.68%降到 2015 年的 76.31%,生境质量指数为 0.9~1 的比例升高,从 1985 年的 18.93%上升到 2015 年的 23.14%,说明 1985—2015 年南京市生境质量普遍在提高,处于高水平的生境质量逐年提高,生境质量

为 0 的面积在逐年减少。

如表 8、附图 12 所示,南京市 1985—2015 年生境质量指数普遍在提高,处于高水平的生境质量逐年提高,生境质量为 0 的面积在逐年减少。其中生境质量指数为 0 的比例最大,约为 75%以上,其次是 0.9~1 的比例约占 18%以上,其他比例较小;南京市生境质量指数为 0 的比例降低,从 1985 年的 80.68%降到 2015 年的 76.31%,生境质量指数为 0.9~1 的比例升高,从 1985 年的 18.93%降到 2015 年的 23.14%;基于预测的 2025 年 3 种不同情景的土地利用数据,通过 InVEST 模型得到:在自然情景下的生境质量降低较明显,高水平的生境质量指数(值为 0.9~1)相比 2015 年比例升高 3.56%,低水平的生境质量指数(值为 0)比例降低 3.85%,在生态保护情景下,高水平的生境质量指数(值为 0.9~1)相比 2015 年比例升高 1.73%,低水平的生境质量指数(值为 0)比例降低 1.89%,在土地优化情景下,高水平的生境质量指数(值为 0.9~1)相比 2015 年比例升高 1.96%,低水平的生境质量指数(值为 0)比例降低 2.20%。

表 7 1985—2025 年南京市生境质量指数分级面积与比例

年份	项目	生境质量等级				
		0	0~0.5	0.5~0.7	0.7~0.9	0.9~1
1985	面积/km ²	5482.49	0.00	2.46	24.20	1286.25
	比例/%	80.68	0.00	0.04	0.36	18.93
1995	面积/km ²	5399.36	0.00	2.50	25.86	1367.68
	比例/%	79.46	0.00	0.04	0.38	20.13
2005	面积/km ²	5157.61	0.01	4.75	32.09	1600.94
	比例/%	75.90	0.00	0.07	0.47	23.56
2015	面积/km ²	5185.51	0.01	4.72	32.79	1572.37
	比例/%	76.31	0.00	0.07	0.48	23.14

(2) 生境退化指数。如表 9 所示,将生境退化指数分为 0~2.5,2.5~5,5~10,10~20,>20 共 5 个等级。其中生境退化指数为 0~2.5 的比例最大,为 90%以上,

其他比例较小。南京市生境退化指数为 0~2.5 的比例升高,从 1985 年的 90.70%升到 2015 年的 94.69%,生境退化指数为 2.5~5 的比例降低,从 1985 年的 4.67%降到 2015 年的 2.87%,生境退化指数为 5~10 的比例降

低,从 1985 年的 3.48%降到 2015 年的 1.59%,说明 1985—2015 年南京市生境退化度普遍在减少,处于高水平的生境退化逐年减少,低水平的生境退化逐年增多,说明近年来对生态植被的保护收到了成效。

表 8 2015—2025 年南京市生境质量指数分级面积与比例

年份	项目	生境质量等级				
		0	0~0.5	0.5~0.7	0.7~0.9	0.9~1
2015	面积/km ²	5185.51	0.01	4.72	32.79	1572.37
	比例/%	76.31	0.00	0.07	0.48	23.14
2025(自然发展情景)	面积/km ²	5447.28	0.00	0.85	16.71	1330.56
	比例/%	80.16	0.00	0.01	0.25	19.58
2025(生态保护情景)	面积/km ²	5314.11	0.00	3.48	23.11	1454.70
	比例/%	78.2	0.00	0.05	0.34	21.41
2025(土地优化情景)	面积/km ²	5334.84	0.00	2.09	19.03	1439.44
	比例/%	78.51	0.00	0.03	0.28	21.18

表 9 1985—2025 年南京市生境退化度分级面积与比例

年份	项目	生境质量				
		0~2.5	2.5~5	5~10	10~20	>20
1985	面积 km ²	6163.11	317.43	236.65	75.14	3.08
	比例/%	90.70	4.67	3.48	1.11	0.05
1995	面积/km ²	6245.40	308.32	187.78	50.67	3.22
	比例/%	91.91	4.54	2.76	0.75	0.05
2005	面积/km ²	6371.82	228.43	135.19	53.18	6.77
	比例/%	93.77	3.36	1.99	0.78	0.10
2015	面积/km ²	6434.30	194.90	108.13	51.25	6.82
	比例/%	94.69	2.87	1.59	0.75	0.10
2025(自然发展情景)	面积/km ²	6481.31	181.58	98.40	32.53	1.58
	比例/%	95.38	2.67	1.45	0.48	0.02
2025(生态保护情景)	面积/km ²	6454.53	187.28	108.91	40.22	4.46
	比例/%	94.98	2.76	1.60	0.59	0.07
2025(土地优化情景)	面积/km ²	6475.92	183.93	100.83	32.82	1.89
	比例/%	95.30	2.71	1.48	0.48	0.03

如表 10、附图 13 所示,近 30 年南京市生境退化度普遍在减少,处于高水平的生境退化逐年减少,低水平的生境退化逐年增多,说明近年来对生态植被的保护收到了成效。其中生境退化指数为 0~2.5 的比例最大,约为 90%以上,其他比例较小。南京市生境退化指数为 0~2.5 的比例升高,从 1985 年的 90.70%升到 2015 年的 94.69%,生境退化指数为 2.5~5 的比例降低,从 1985 年的 4.67%降到 2015 年的 2.87%,生境退化指数为 5~10 的比例降低,从 1985 年的 3.48%降到 2015 年的 1.59%。

基于预测的 2025 年 3 种不同情景的土地利用数据,通过 InVEST 模型,得到高水平的生境退化指数(值为 2.5~5)比例降低 0.32%,低水平的生境退化指数(值为 0~2.5)比例升高 0.99%;在生态保护情景下,高水平的生境退化指数(值为 2.5~5)比例降低 0.07%,低水平的生境退化指数(值为 0~2.5)比例升高 0.40%;在土地优化情景下,高水平的生境退化指数(值为 2.5~5)比例降低 0.16%,低水平的生境退化指数(值为 0~2.5)比例升高 0.57%。

表 10 2015—2025 年南京市生境退化指数分级面积与比例

年份	项目	生境退化等级				
		0~2.5	2.5~5	5~10	10~20	>20
2015	面积/km ²	6434.3	194.9	108.13	51.25	6.82
	比例/%	94.69	2.87	1.59	0.75	0.1
2025(自然发展情景)	面积/km ²	6501.6	173.23	89.96	29.54	1.06
	比例/%	95.68	2.55	1.32	0.43	0.02
2025(生态保护情景)	面积/km ²	6461.72	190.35	102.47	36.14	4.71
	比例/%	95.09	2.80	1.51	0.53	0.07
2025(土地优化情景)	面积/km ²	6473.57	183.99	102.69	32.73	2.42
	比例/%	95.26	2.71	1.51	0.48	0.04

3 结论

(1) 南京市 1985—2015 年近 30 年土地利用变化主要表现为湿地、建设用地的增加,森林、草地和耕地的减少。2025 年整体生境质量较 2015 年降低较多,生境退化明显;生态保护情景下耕地转换为建设用地的速率减缓了 5%,对南京市的生态状况转变有极大好处,整体生境质量较自然发展情景有所提高,生境退化较自然发展情景缓解较多;土地优化情景兼顾发展对土地的需求,同时也注重保护生态环境,建设用地增加量为自然增长量的 64%,整体生境质量较自然发展情景有所提高,生境退化较自然发展情景缓解较多,但均低于生态保护情景,保证了经济发展和生态保护的平衡。生态保护情景和土地优化情景对生态用地的保护作用非常明显,在一定程度上优化了城市土地利用,改善了生活环境,对推进城镇用地有序扩张,确保城乡社会经济的协调、持续发展具有积极作用。

(2) 本研究在以往学者土地利用预测基础上,添加人文空间因子,较好地反映了人文因素对土地利用的影响,是模型研究的创新点。同时引入空间自相关因子,拟合优度高于传统模型,使得耕地、水域、建设用地的拟合优度有了较大的提升。将土地利用变化预警模型与生态服务功能模型结合起来,在研究思路,将景观变化和生态保护相结合,思路上有所创新,使得城市土地利用规划加入生态服务功能评价,可实现土地利用开发与环境保护协调发展、人与自然的和谐统一,同时模型相关参数的设定随着地形、降雨和不同地区经济发展和政策干预不同而不同,对于各个参数的设定,需要今后进一步的改进和深化。

参考文献:

- [1] Deadman P, Brown R D, Gimblett H R. Modelling rural residential settlement patterns with cellular automata[J]. *Journal of Environmental Management*, 1993, 37(2): 147-160.
- [2] Batty M, Xie Y. From cells to cities[J]. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 1994, 21(7): S31-S48.
- [3] White R, Engelen G. Cellular automata as the basis of integrated dynamic regional modelling [J]. *Environment & Planning B: Planning & Design*, 1997, 24(2): 235-246.
- [4] Couclelis H. From cellular automata to urban models: new principles for model development and implementation[J]. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 1997, 24(2): 165-174.
- [5] Wu F, Webster C J. Simulation of land development through the integration of cellular automata and multicriteria evaluation[J]. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 1998, 25(1): 103-126.
- [6] Lett C, Silber C, Dube P, et al. Forest dynamics: A spatial gap model simulated on a cellular automata network[J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 1999, 25(4): 403-411.
- [7] 孙贤斌, 刘红玉, 李玉凤, 等. 基于 CA-Markov 模型土地利用对景观格局影响辨识[J]. *生态与农村环境学报*, 2009, 25(1): 1-7.
- [8] 黎夏, 杨青生, 刘小平. 基于 CA 的城市演变的知识挖掘及规划情景模拟[J]. *中国科学: D 辑 地球科学*, 2007, 37(9): 1242-1251.
- [9] 何春阳, 陈晋, 史培军, 等. 基于 CA 的城市空间动态模型研究[J]. *地球科学进展*, 2002, 17(2): 188-195, 303.
- [10] 赵建军, 张洪岩, 乔志和, 等. 基于 CA-Markov 模型的向海湿地土地覆被变化动态模拟研究[J]. *自然资源学报*, 2009, 24(12): 2178-2186.
- [11] Forster J, Lake I R, Watkinson A R, et al. Marine biodiversity in the Caribbean UK overseas territories: Perceived threats and constraints to environmental management[J]. *Marine Policy*, 2011, 35(5): 647-657.
- [12] Rojas C, Pino J, Basnou C, et al. Assessing land-use and-cover changes in relation to geographic factors and urban planning in the metropolitan area of Concepción (Chile): Implications for biodiversity conservation[J]. *Applied Geography*, 2013, 39: 93-103.
- [13] Billionnet A. Mathematical optimization ideas for biodiversity conservation[J]. *European Journal of Operational Research*, 2013, 231(3): 514-534.
- [14] Corona P, Chirici G, McRoberts R E, et al. Contribution of large-scale forest inventories to biodiversity assessment and monitoring [J]. *Forest Ecology and Management*, 2011, 262(11): 2061-2069.
- [15] Barbati A, Marchetti M, Chirici G, et al. European forest types and forest Europe SFM indicators: Tools for monitoring progress on forest biodiversity conservation [J]. *Forest Ecology & Management*, 2014, 321(321): 145-157.
- [16] 杨德伟, 陈治谏, 陈友军, 等. 基于景观生态学基本理论的生物多样性研究[J]. *地域研究与开发*, 2006, 25(1): 111-115, 124.
- [17] 刘振生, 高惠, 滕丽微, 等. 基于 MAXENT 模型的贺兰山岩羊生境适宜性评价[J]. *生态学报*, 2013, 33(22): 7243-7249.
- [18] 何丹, 金凤君, 周璟. 基于 Logistic-CA-Markov 的土地利用景观格局变化: 以京津冀都市圈为例[J]. *地理科学*, 2011, 31(8): 903-910.
- [19] Pontius R G. Quantification error versus location error in comparison of categorical maps[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2000, 66(8): 1011-1016.