



农业资源与环境学报

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FLUS和InVEST模型的南京市生境质量多情景预测

高周冰, 王晓瑞, 隋雪艳, 汪翔, 范业婷, 朱青, 吕立刚

引用本文:

高周冰, 王晓瑞, 隋雪艳, 汪翔, 范业婷, 朱青, 吕立刚. 基于FLUS和InVEST模型的南京市生境质量多情景预测[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(5): 1001–1013.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0411>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

黄河三角洲滨海湿地退化过程的时空变化及预测分析

于淼, 栗云召, 屈凡柱, 周迪, 战超, 王雪宏

农业资源与环境学报. 2020, 37(4): 484–492 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0110>

Google Earth Engine平台支持下的南流江流域生态环境质量动态监测

杨坤士, 卢远, 翁月梅, 韦丽珍

农业资源与环境学报. 2021, 38(6): 1112–1121 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0536>

铁矿生态修复区生态系统服务价值增量评估

叶尔纳尔·胡马尔汗, 马伟波, 徐向华, 迪丽努尔·托列吾别克, 方颖, 李海东

农业资源与环境学报. 2020, 37(4): 594–600 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0197>

高标准农田建设对耕地质量的影响及灌排指标的贡献

张天恩, 李子杰, 费坤, 詹雪洁, 高沪宁, 张铭, 马友华

农业资源与环境学报. 2022, 39(5): 978–989 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0332>

钝化材料的老化对水稻土中Cd钝化稳定性的影响

单志军, 陈勇红, 张丽, 刘岩, 焦位雄, 林大松

农业资源与环境学报. 2021, 38(2): 167–175 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0218>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

高周冰, 王晓瑞, 隋雪艳, 等. 基于 FLUS 和 InVEST 模型的南京市生境质量多情景预测[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(5): 1001–1013.

GAO Z B, WANG X R, SUI X Y, et al. Multi-scenario prediction of habitat quality in Nanjing based on FLUS and InVEST models[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2022, 39(5): 1001–1013.



开放科学 OSID

基于 FLUS 和 InVEST 模型的南京市生境质量多情景预测

高周冰^{1,2}, 王晓瑞³, 隋雪艳³, 汪翔⁴, 范业婷^{1,2}, 朱青⁵, 吕立刚^{1,2*}

(1. 南京财经大学公共管理学院, 南京 210023; 2. 自然资源部海岸带开发与保护重点实验室, 南京 210000; 3. 江苏省土地开发整理中心, 南京 210017; 4. 深圳市宝安区城市更新和土地整备局, 广东 深圳 518100; 5. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

摘要: 为评估城市扩张对生境质量的影响, 以江苏省南京市为例, 基于 2009、2014 年和 2018 年 3 期土地利用数据, 采用 CA-Markov 和 FLUS 耦合模型对南京市 2025 年和 2035 年土地利用进行多情景预测, 并运用 InVEST 模型评估其生境质量状况。结果表明, 2009—2018 年, 南京市城镇用地呈不断扩张趋势, 面积共增加 223.65 km², 主要转入来源为耕地和农村居民点。2009、2014 年和 2018 年市域的平均生境质量呈持续下降趋势, 分别为 0.448 1、0.441 1 和 0.433 4。4 种模拟预测情景中, 生境质量均值的排序为生态优先情景>协调发展情景>自然增长情景>经济发展情景, 而生境质量等级分布差别较大的区域主要是南京市的北部、南部以及中心城区。具体来说, 在自然增长情景下, 2025 年和 2035 年南京市生境质量将保持下降趋势, 低值区面积占比较 2018 年分别增加 1.40 个百分点和 2.87 个百分点; 在经济发展情景下, 中心区域、南部及北部生境质量较自然发展情景下进一步下降, 到 2025 年和 2035 年, 低值区面积占比将分别增加 2.67 个百分点和 4.76 个百分点; 在生态优先情景下, 2025 年和 2035 年南京市生境质量高值区面积占比较 2018 年分别增加 0.40 个百分点和 1.04 个百分点; 而协调发展情景下, 城镇用地规模将得到有序控制, 林地的空间分布在原有基础上向外延伸, 使得市域生境质量逐步提升, 故 2025 年和 2035 年南京市生境质量高值区面积占比分别增加 0.17 个百分点和 0.80 个百分点。基于此, 为进一步减缓南京市生境退化趋势, 改善区域生境质量和生态环境条件, 应合理控制城镇用地规模, 采取适当的生态保护政策, 同时有序开展国土空间整治与生态修复工作。

关键词: 生境质量; CA-Markov 模型; FLUS 模型; InVEST 模型; 多情景预测

中图分类号: X826

文献标志码: A

文章编号: 2095-6819(2022)05-1001-13

doi: 10.13254/j.jare.2021.0411

Multi-scenario prediction of habitat quality in Nanjing based on FLUS and InVEST models

GAO Zhoubing^{1,2}, WANG Xiaorui³, SUI Xueyan³, WANG Xiang⁴, FAN Yeting^{1,2}, ZHU Qing⁵, LÜ Ligang^{1,2*}

(1. School of Public Administration, Nanjing University of Finance and Economics, Nanjing 210023, China; 2. Key Laboratory of Coastal Zone Exploitation and Protection, Ministry of Natural Resources, Nanjing 210000, China; 3. Jiangsu Land Development and Consolidation Center, Nanjing 210017, China; 4. City Renewal and Land Preparation Bureau of Bao'an District, Shenzhen 518100, China; 5. Nanjing Institute of Geography & Limnology, CAS, Nanjing 210008, China)

Abstract: Assessing the impact of urban expansion on habitat quality is critical for advancing urban sustainability. Based on the land use data of Nanjing in 2009, 2014, and 2018, we used the CA-Markov and FLUS coupling model to predict the land use of Nanjing in 2025 and 2035 under multiple scenarios, and then used the InVEST model to evaluate the habitat quality. The results showed that the urban land area in Nanjing increased by 223.65 km² from 2009 to 2018, which was mainly from cultivated land and rural residential land. The average habitat quality of Nanjing showed downward trends of 0.448 1, 0.441 1, and 0.433 4 in 2009, 2014, and 2018, respectively. Among the four

收稿日期: 2021-07-05 录用日期: 2021-09-28

作者简介: 高周冰(1997—), 女, 浙江嘉兴人, 硕士研究生, 主要研究方向为土地利用与生态环境效应。E-mail: shineover@foxmail.com

*通信作者: 吕立刚 E-mail: liganglv@nufe.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(41801169); 自然资源部海岸带开发与保护重点实验室开放基金项目(2019CZEPK06); 江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX21_1410)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(41801169); Open Fund Project of Key Laboratory of Coastal Zone Development and Protection, Ministry of Natural Resources(2019CZEPK06); Jiangsu Postgraduate Research and Practice Innovation Program(KYCX21_1410)

simulated prediction scenarios, the average habitat quality was ranked as follows: ecological priority scenario > coordinated development scenario > natural growth scenario > economic development scenario. In addition, the areas with large differences in the distribution of habitat quality grades were mainly in the northern, southern, and central urban areas of Nanjing. Specifically, under the natural growth scenario, the habitat quality of Nanjing was forecast to maintain the current downward trend in 2025 and 2035. Compared with 2018, the area proportion of low value was predicted to increase by 1.40 percent points and 2.87 percent points in 2025 and 2035, respectively. Under the economic development scenario, the habitat quality of the central, southern, and northern areas was forecast to further decline compared with the natural development scenario, with the low value area proportion predicted to increase by 2.67 percent points and 4.76 percent points in 2025 and 2035, respectively. Under the ecological priority scenario, the high value area proportion of Nanjing's habitat quality was forecast to further increase by 0.40 percent points and 1.04 percent points in 2025 and 2035, respectively, compared with that in 2018. Under the coordinated development scenario, the scale of urban land was found to be controlled in an orderly manner, and the spatial distribution of woodland was predicted to extend outward from the original layout, which would gradually improve the urban habitat quality. Therefore, the high value area proportion of Nanjing's habitat quality was forecast to increase by 0.17 percent points and 0.80 percent points in 2025 and 2035, respectively. To decrease the trend of habitat degradation, improve regional habitat quality and ecological environment conditions, it is necessary to control the scale of urban land use, adopt appropriate ecological protection policies, and carry out spatial renovations and ecological restoration work across the national territory in an orderly manner.

Keywords: habitat quality; CA-Markov model; FLUS model; InVEST model; multi-scenario prediction

城镇化作为全球化趋势,所引起的建设用地规模扩张,为城市发展提供了必要的物质空间^[1-3],但也给区域可持续发展带来一定的负面影响。如城市扩张无法避免会导致耕地、林地和草地等具有生态功能的土地流失,从而影响城市的景观格局及生境的可持续性^[4]。所谓生境,是指为人类和其他物种提供生存空间的自然环境;而生境质量,则是自然环境为个体或种群生存提供适宜条件的能力,也是维持生物多样性、区域城市可持续性和人类福祉的重要因素^[5]。城市扩张对生境的影响主要是通过改变区域土地の利用类型来影响物质流、能量流在生境各斑块之间循环流动的过程,从而改变生境的分布格局^[6],具体表现为生境斑块的逐渐破碎和减少、生物多样性降低以及生态系统服务功能的退化与改变^[7]。因此,分析城市扩张对生境质量的影响,探究城市扩张与生境质量之间的关系,可为区域权衡生态保护与城市发展提供重要的参考^[8]。

近年来,国内外学者采用多样化的方法从不同尺度对多地生境质量开展了深入研究。学者们早期主要是通过通过对生物多样性和栖息地的实地调查来评估野生动物栖息地质量,即通过构建评价指标体系来研究生境质量^[9],但这种方式耗时费力,难以在大尺度区域开展。之后产生的模型评价法由于具有简单易操作性便逐渐替代了原来的实地调查方式,并被学者广泛应用,如MaxEnt模型、ARIES模型、SoLVES模型以及InVEST模型等,其中InVEST模型由于具有对数据需求量少及评估精度高的特点,在生境质量评估领

域中应用最为广泛^[10-11]。当前较多研究基于单期或多期土地利用数据,通过土地利用变化来分析区域内生境质量时空演化特征^[12],或采用生态系统服务价值评价模型、NPP与NDVI的生境质量指数、InVEST模型及地理探测器等多种模型与方法,定量研究生境质量空间分布特征及其影响因素^[13]。但设定不同情景模拟评估生境质量变化状况的研究相对较少,且在模拟预测土地利用变化时,采用多个模型耦合进行的研究也相对较少。多情景评估城市不同发展形态下生境质量的变化情况^[14],对未来制定城市及区域的生态环境保护 and 自然资源管理政策具有重要意义。

南京市是我国东部地区特大城市,也是长江经济带的门户城市。《南京市生态文明建设规划2018—2020(修编)》显示,南京市当前城市建设高速推进、经济快速发展、资源约束趋紧,生态环境质量尚未根本好转。因此,以南京市为例探讨城市生境质量演变趋势及特大城市生态系统服务功能的提升具有一定的代表性和典型性。本研究基于2009、2014年和2018年3期土地利用数据,采用CA-Markov、FLUS和InVEST模型,在分析南京市土地利用及生境质量时空变化的基础上,模拟评估不同发展情景下南京市2025年和2035年土地利用变化状况及生境质量的响应趋势,以期南京市区域生物多样性保护和自然资源规划管理提供科学参考,同时也可对长江经济带其他类似城市的生态环境与区域可持续性研究提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

南京市位于长江下游中部、江苏省西南部,是我国东部地区重要的中心城市、全国重要的科研教育基地和综合交通枢纽,属宁镇扬丘陵地区,地貌以低山缓岗为主(图1),低山缓岗区域面积约占全市总面积的60.80%,洼地、平原和河流湖泊约占39.20%。全市林木覆盖率为31.30%,建成区绿化覆盖率为45.16%。南京市属亚热带季风气候,年平均气温15.4℃,年平均降水为1090.4 mm。2019年末,常住人口850.0万人,其中城镇常住人口707.2万人,常住人口城镇化率为83.2%,远高于全国平均水平(60.60%),处于城镇化后期,是中国高度城镇化区域之一。南京市地区生产总值为14030.15亿元,人均地区生产总值为165682元,三次产业增加值结构为2.1:35.9:62.0。全市土地总面积6537.02 km²,土地利用主要以城镇用地和耕地为主,其中城镇用地1023.78 km²,占15.54%,耕地3480.24 km²,占52.83%,而园地、林地、草地以及水域等生境地类共1428.06 km²,占21.68%。

1.2 数据来源

本研究所采用的2009、2014年和2018年3期土

地利用数据来自全国第二次土地利用调查及年度变更。该数据具有分类全面、精度高等特点,起始年份为2009年,截止年份为2018年。其依照《土地利用现状分类》(GB/T 21010—2007)进行地类划分,南京市所涉及地类包括耕地、园地、林地、草地、城镇村及工矿用地、水域及水利设施用地等共8个一级类和32个二级类。根据研究需要,参照《市(地)级土地利用总体规划编制规程》(TD/T 1023—2010)中土地利用分类思路及相关文献^[15-17],将二级类归并为耕地、园地、林地、草地、其他农用地、城镇用地(包含城市和建制镇)、农村居民点、采矿用地、交通水利用地、其他建设用地(主要是风景名胜及特殊用地)、水域和自然保留地(包含裸地、沙地、内陆滩涂和沼泽地)等12个地类。空间分析可视化表达所需的江苏省及南京市行政矢量边界数据来源于全国地理信息资源目录服务系统(<http://www.webmap.cn>)。DEM数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>)。用于土地利用模拟的河流数据提取自土地利用数据,坡度和坡向数据提取自DEM数据,道路数据来自OpenStreetMap,城市中心数据来自《南京市土地利用总体规划(2006—2020年)》《南京市城市总体规划(2011—2020年)》及《南京市城市总体规划(2018—2035)》草案等。南京

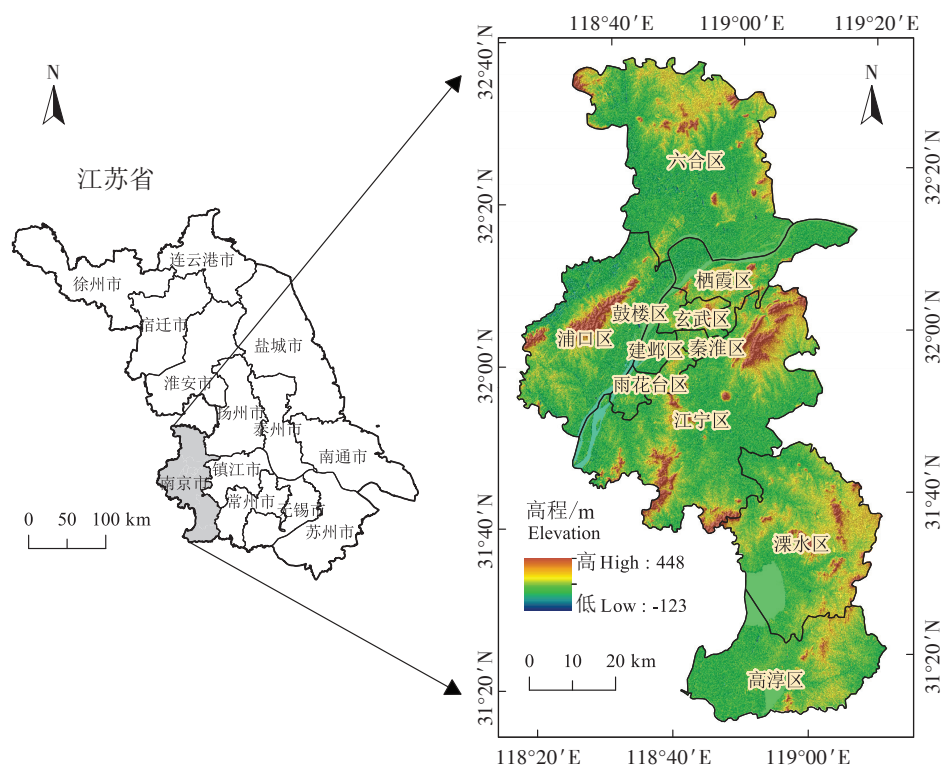


图1 研究区位置

Figure 1 The location of the study area

市GDP等社会经济数据来源于《江苏统计年鉴》。

1.3 研究框架与方法

1.3.1 研究框架

首先,基于南京市2009、2014年和2018年的3期土地利用及相关数据,采用转移矩阵、图谱分析等方法刻画2009—2018年城市土地利用变化特征;然后,采用CA-Markov模型多情景预测2025年和2035年的土地利用数量结构,在此基础上,运用FLUS模型模拟不同发展情景下土地利用的空间分布状况;最后,基于3期历史土地利用以及上述模拟预测所获得的2025年和2035年土地利用分布状况,采用InVEST模型的Habitat quality模块来评估生境质量变化状况以及不同情景下生境质量的响应趋势。具体研究框架如图2所示。

1.3.2 基于CA-Markov和FLUS耦合模型的土地利用模拟及情景设置

(1)CA-Markov模型

本研究采用IDRISI 17.0软件中的CA-Markov模型进行土地利用数量结构预测,该模型结合了CA模型空间维度分析的优势和Markov模型时间维度分析的优势^[18-19]。其中,元胞自动机(Cellular Automata, CA)由元胞、元胞状态、邻域、转换规则4部分组成,该模型的研究思路是从局部元胞个体的简单行为拓展至全局^[14]。模型的表达式为:

$$S_{(t+1)}=f(S_{(t)},N) \quad (1)$$

式中: $S_{(t+1)}$ 、 $S_{(t)}$ 分别为 $t+1$ 和 t 时元胞的状态集合; N 为元胞的邻域; f 为元胞转换规则。

Markov模型以概率论方法为基础,在一个随机时间序列中,由随机事件基于当前状态以及变化的趋势对未来的可能性进行估算^[19]。该模型的关键是获取事物的转移概率矩阵。其表达式为:

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

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

$$0 \leq P_{ij} < 1 \text{ 且 } \sum_{j=1}^n P_{ij} = 1 \quad (i,j=1,2,\cdots,n) \quad (4)$$

式中: P_{ij} 为系统的转移概率矩阵; n 为研究区的土地利用类型。

(2)FLUS模型

本研究采用FLUS模型进行土地利用空间分布的模拟。FLUS模型是在CA模型的基础上进一步改良而成的,该模型包括适宜性概率计算、邻域因子计算、自适应惯性系数计算、转换成本设定以及综合概率计算^[20]。

适宜性概率计算通过BP-ANN(人工神经网络)算法将基期的土地利用类型与多项空间驱动因子进行拟合,从而获得各土地利用类型的适宜性概率^[21],其表达式为:

$$sp(p,k)=\sum_j w_{j,k} \times \frac{1}{1+e^{-N_j(p,q)}} \quad (5)$$

$$N_j(p,q)=\sum_i w_{i,j} \times x_i(p,q) \quad (6)$$

式中: $sp(p,k)$ 为适宜性概率; $w_{j,k}$ 为隐藏层与输出层的权重; $N_j(p,q)$ 表示隐藏层神经元 j 接收输入层信号; $x_i(p,q)$ 为第 i 个神经元在迭代次数为 q 时元胞 p 的输入值; $w_{i,j}$ 为输入层与隐藏层的权重。

邻域因子表示不同土地利用类型间及邻域范围内不同土地利用单元间的相互作用^[22],其表达式为:

$$\Omega_{p,k}^t=\frac{\sum_{N \times N} con(c_p^{t-1}=k)}{N \times N-1} \times w_k \quad (7)$$

式中: $\Omega_{p,k}^t$ 为元胞 p 在 t 时刻的邻域影响因子;

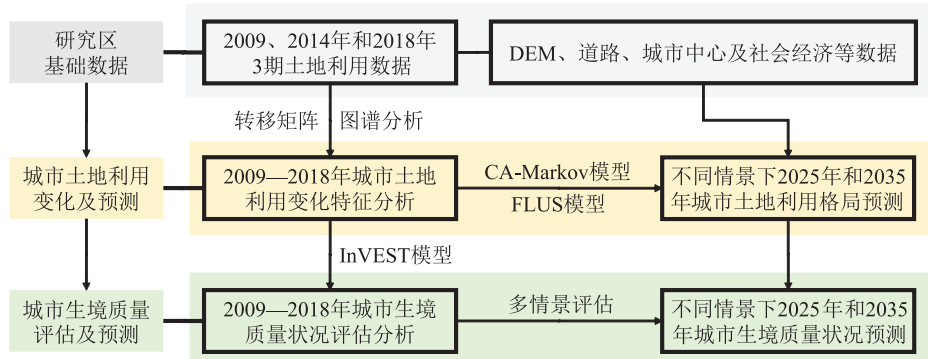


图2 研究框架图

Figure 2 Research framework

$\sum_{N \times N} \text{con}(c_p^{t-1} = k)$ 表示用地类型 k 在最后一次迭代 $t-1$ 时,在 $N \times N$ 的 Moore 邻域窗口中所占的元胞总数; w_k 表示各用地类型的邻域因子参数^[20]。其中,邻域因子参数取值范围为 $[0, 1]$,且其数值与用地扩展能力成正比。本研究各类用地邻域因子参数^[21]的设置主要基于未来发展趋势,具体参数设置见表1。

自适应惯性系数用于显示各土地利用类型在预期与实际上的数量差异^[23],其表达式为:

$$Inertia_k^t = \begin{cases} Inertia_k^{t-1}, & |D_k^{t-2}| \leq |D_k^{t-1}| \\ Inertia_k^{t-1} \times \frac{D_k^{t-2}}{D_k^{t-1}}, & D_k^{t-1} < D_k^{t-2} < 0 \\ Inertia_k^{t-1} \times \frac{D_k^{t-1}}{D_k^{t-2}}, & 0 < D_k^{t-2} < D_k^{t-1} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $Inertia_k^t$ 为用地类型 k 在迭代时间 t 时的惯性系数; D_k^{t-1} 表示 $t-1$ 时用地需求和实际数量之差。

转换成本是指转换用地类型所要付出的代价,其值介于 $[0, 1]$,数值大小与转换难度成正比^[21]。

综合概率是综合以上4个因素,从而估算设定用地类型所占单元的总转换概率,其表达式为:

$$TProb_{p,k}^t = sp(p, k) \times \Omega_{p,k}^t \times Inertia_k^t \times (1 - sc_{c \rightarrow k}) \quad (9)$$

式中: $TProb_{p,k}^t$ 表示元胞 P 在 t 时从初始用地类型转变为用地类型 k 的综合概率; $\Omega_{p,k}^t$ 表示邻域影响因子; $Inertia_k^t$ 表示 k 地类在 t 时的惯性系数; $sc_{c \rightarrow k}$ 表示用地类型从 c 变为 k 的转换成本。

本研究土地利用预测过程中,采用 CA-Markov 和 FLUS 耦合模型进行模拟预测,模拟过程中主要考虑坡度、坡向、距河流的距离、距城市中心的距离和距交通干道的距离等5个驱动因子^[19]。验证模拟精度时,以2014年为基期数据,运用上述方法模拟2018年土地利用情况。在此基础上,利用 $Kappa$ 系数将2018年模拟图与现状图进行交叉对比检验。其表达式为:

$$Kappa = \frac{P_o - P_c}{P_p - P_c} \quad (10)$$

式中: P_o 为模拟正确栅格数量与总数量的比值; P_c 为随机状态下模拟正确栅格数量与总数量的比值; P_p 为理想状态下模拟正确栅格数量与总数量的比值。当 $Kappa > 0.8$ 时,模拟效果极好,结果可信度高,一致性程度极好;当 $0.6 < Kappa \leq 0.8$ 时,模拟效果较好,一致性程度好;当 $0.4 < Kappa \leq 0.6$ 时,模拟效果有效,一致性程度为中等;当 $0.2 < Kappa \leq 0.4$ 时,模拟效果较差;当 $Kappa \leq 0.2$ 时,模拟效果极差^[24]。

(3) 土地利用模拟情境设置

参考相关研究^[25-29]并根据研究区经济发展和生态保护的相关政策、可持续发展要求^[30]以及未来发展的多种可能性,本研究基于城市扩张速度和生态保护程度设置自然增长、经济发展、生态优先和协调发展等4种典型情景模式,用来模拟预测南京市2025年和2035年土地利用类型的数量及空间分布情况,具体设置如下:

情景 I: 自然增长情景。本情景不考虑土地利用总体规划、城市总体规划等国土空间规划的约束情况,仅考虑历史趋势下的城市扩张,主要根据2009—2018年土地利用转移概率矩阵以及适宜分布概率来设置模拟条件。

情景 II: 经济发展情景。通过测算2009—2018年南京市GDP与各地类的相关系数发现,GDP与城镇用地的相关系数最高,为0.99 ($P < 0.01$),表明南京市的经济发展与城镇用地密切相关。因此,经济发展情景主要是针对城镇用地规模而言。在该情景中,耕地、园地、林地、草地、其他农用地、农村居民点和自然保留地等地类向城镇用地的转移概率增加50%,而城镇用地不再向这些地类转化。

情景 III: 生态优先情景。此情景假定南京市进入中高速的高质量发展阶段,城市扩张速度下降倒逼土地利用效率提高。根据《江苏省国家级生态保护红线规划》,南京陆域生态保护红线范围内的面积为

表1 邻域因子参数

Table 1 Neighborhood factor parameters

土地利用类型 Land use type	邻域因子参数 Neighborhood factor parameter (w_k)	土地利用类型 Land use type	邻域因子参数 Neighborhood factor parameter (w_k)
耕地 Cultivated land	0.5	农村居民点 Rural residential land	0.01
园地 Orchard land	0.5	采矿用地 Mining land	1
林地 Forest land	0.5	交通水利用地 Traffic and water conservancy land	1
草地 Grassland	0.5	其他建设用地 Other construction land	1
其他农用地 Other agricultural land	0.5	水域 Water body	0.5
城镇用地 Urban land	1	自然保留地 Natural reserve	1

527.50 km², 占南京市土地面积的 8.07%。在此情景中, 严格落实生态红线制度并积极主动实施生态建设, 将生态红线区域设置为地类禁止转化区域; 但生态红线范围外的耕地、园地、草地、其他农用地和自然保留地向城镇用地的转移概率均降低 100%, 与此同时, 农村居民点、采矿用地、交通水利用地和其他建设用地向林地的转换概率增加 100%, 而林地不再向其他地类转化。

情景Ⅳ: 协调发展情景。此情景是在综合考虑以上 3 种模拟情景后, 假定南京市在严守生态红线的同时, 兼顾经济发展, 二者协调发展。在此情景中, 将生态红线区域设置为地类禁止转化区域; 生态红线范围外的耕地、园地、草地、其他农用地和自然保留地向城镇用地的转移概率降低 50%, 农村居民点、采矿用地、交通水利用地和其他建设用地向林地的转换概率增加 50%, 而林地不再向其他地类转化。

1.3.3 基于 InVEST 模型的生境质量评估

本研究利用 InVEST 3.9.0 软件中的生境质量模型对南京市的生境质量进行评估。生境质量模型以土地利用数据为基础, 从威胁因子的最大胁迫距离、权重以及不同土地利用类型对各威胁因子的生境适宜性和敏感性等方面进行生境质量评估^[19]。生境质量评估包括生境适宜度和退化度的计算, 二者取值范围均为[0, 1], 其中, 生境退化度是威胁因子对生境的干扰强度, 生境质量为生境的适宜程度^[31]。本研究主要是对生境质量的分析, 而生境质量的计算则基于生境退化度, 因此在生境质量测算前应先进行生境退化度的计算。生境退化度的表达式为:

$$D_{xy} = \sum_{r=1}^R \sum_{y=1}^{Y_r} \left| \frac{w_r}{\sum_{r=1}^R w_r} \right| \times r_y \times i_{rxy} \times \beta_x \times S_{jr} \quad (11)$$

式中: D_{xy} 表示生境类型 j 中第 x 个生境像元的生境退化度; R 为生境的威胁因子数量; Y_r 为威胁因子 r 中的栅格数; w_r 为威胁因子 r 的权重; r_y 为每个栅格上的威

胁因子个数; i_{rxy} 表示威胁因子 r 对生境每个栅格产生的影响(线性或指数); β_x 表示地方保护政策等影响, 但本研究中暂未考虑; S_{jr} 表示每种生境对不同威胁因子的相对敏感程度。

生境质量得分的表达式为:

$$Q_{xy} = H_j \left(1 - \frac{D_{xy}^z}{D_{xy}^z + k^z} \right) \quad (12)$$

式中: Q_{xy} 表示生境类型 j 中第 x 个生境像元的生境质量得分, 取值范围为[0, 1]; H_j 表示生境类型 j 的生境适宜度; k 和 z 采用模型默认参数^[32]。

考虑到耕地、其他农用地、城镇用地、农村居民点、采矿用地和交通水利用地等 6 种地类的人类活动剧烈, 因此将其作为非生境地类; 而园地、林地、草地和水域等受人类活动影响较小的地类则作为生境^[33]。非生境地类在 InVEST 模型中列为威胁因子, 参考相关研究^[15, 34], 对其最大胁迫距离、权重、适宜度、敏感性进行量化分析, 具体内容见表 2 和表 3。

2 结果与分析

2.1 南京市土地利用时空变化特征及预测

2.1.1 2009—2018 年南京市土地利用时空变化特征

2009—2018 年, 城镇用地快速扩张、耕地和农村居民点持续减少是南京市土地利用变化的主要特征。其中, 城镇用地增加 223.65 km², 增幅高达 31.29%; 耕地减少 53.17 km², 降幅为 2.22%; 农村居民点减少 98.62 km², 降幅为 17.09%。通过绘制土地利用转移弦图进一步解释 9 年间主要的土地利用转移情况(图 3), 为了能更清晰直观地了解主要地类间的转化情况, 图 3 中未显示地类间转化面积小于 3 km² 的转化关系。从图 3 中可以看出, 2009—2018 年城镇用地新增面积的主要来源为耕地和农村居民点, 共占城镇用地新增面积的 63.08%。其中, 2009—2014 年城镇用地面积增加 58.95 km², 年均增加 11.79 km²。城镇用地新增面积主要来源为耕地(图 3a), 其转化面积占

表 2 影响生境质量的威胁因子的最大距离、权重和空间衰减类型

Table 2 The maximum distance, weight and spatial decay type of threat factors affecting habitat quality

威胁因子 Threat factor	最大胁迫距离 Maximum distance/km	权重 Weight	空间衰减类型 Spatial decay type
耕地 Cultivated land	6	0.5	指数
其他农用地 Other agricultural land	7	0.5	指数
城镇用地 Urban land	11	0.8	指数
农村居民点 Rural residential land	8	0.8	指数
采矿用地 Mining land	12	1	指数
交通水利用地 Traffic and water conservancy land	9	0.8	线性

表3 不同土地利用类型的生境适宜度及其对威胁因子的敏感性
Table 3 Habitat suitability and sensitivity of different land use types to threat factors

土地利用类型 Land use type	生境适宜度 Habitat suitability	威胁因子 Threat factor					
		耕地 Cultivated land	其他农用地 Other agricultural land	城镇用地 Urban land	农村居民点 Rural residential land	采矿用地 Mining land	交通水利用地 Traffic and water conservancy land
耕地 Cultivated land	0.5	0.3	0.4	0.5	0.4	0.6	0.2
园地 Orchard land	0.6	0.4	0.4	0.6	0.5	0.7	0.2
林地 Forest land	1	0.4	0.5	0.6	0.7	0.7	0.3
草地 Grassland	0.9	0.4	0.5	0.6	0.8	0.7	0.4
其他农用地 Other agricultural land	0.4	0.3	0.3	0.6	0.6	0.6	0.3
城镇用地 Urban land	0	0	0	0	0	0	0
农村居民点 Rural residential land	0	0	0	0	0	0	0
采矿用地 Mining land	0	0	0	0	0	0	0
交通水利用地 Traffic and water conservancy land	0	0	0	0	0	0	0
其他建设用地 Other construction land	0.8	0.5	0.6	0.9	0.8	1	0.4
水域 Water body	0.9	0.6	0.6	0.8	0.7	0.9	0.5
自然保留地 Natural reserve	0.9	0.6	0.7	0.9	0.8	1	0.6

城镇用地新增面积的近50%。而在2014—2018年间,城镇用地面积进一步增加,增加量为164.70 km²,年均增加高达41.18 km²。与2009—2014年相比,2014—2018年城镇用地扩张速度快了近4倍,其新增面积主要来源也变为农村居民点和耕地(图3b),其中农村居民点转化为城镇用地的面积占城镇用地新增面积的比例最大(50.11%)。虽然这一时期城镇用地新增面积的最大来源不是耕地,但其占用耕地的面积却较2009—2014年增加了1倍多,占城镇用地新增面积的29.46%。从图4可以看出,城镇用地占用耕地主要发生在城市外围,且随着距城市中心距离的增

加,占用的耕地面积逐渐减少。此外,占用农村居民点的空间分布相对比较集中,主要分布在中心城区周边区域,并有向西部、南部以及东南部转移的趋势(图4d)。
2.1.2 不同情景下南京市2025年和2035年土地利用模拟预测

在运用CA-Markov和FLUS耦合模型预测南京市2025年和2035年的土地利用情况之前,首先基于2014年土地利用现状、道路和城市中心等相关数据,采用CA-Markov模型预测2018年的土地利用数量结构,在此基础上,运用FLUS模型模拟2018年的土地利用空间分布;其次,将2018年模拟预测结果与2018

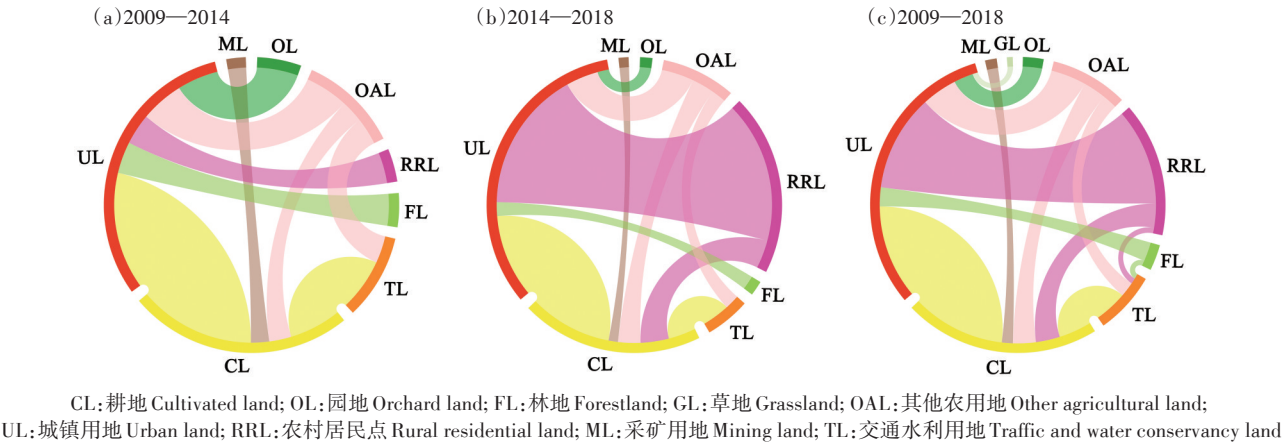


图3 2009—2018年南京市土地利用转移图

Figure 3 Land use transfer of Nanjing City from 2009 to 2018

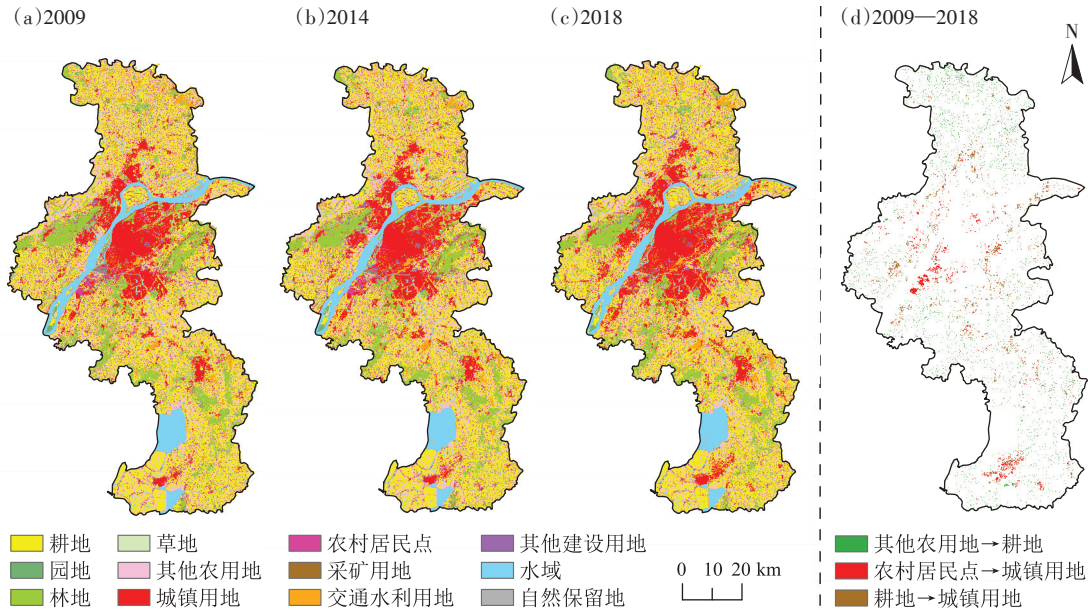


图4 2009—2018年南京市土地利用状况及变化

Figure 4 Land use status and changes in Nanjing City from 2009 to 2018

年土地利用现状进行对比。通过计算得到 $Kappa$ 系数为 0.82, 其中, 耕地、林地以及城镇用地等关键用地的 $Kappa$ 系数分别为 0.65、0.77、0.83, 这表明模拟预测效果极好, 模型可用。在此基础上采用校验好的 CA-Markov 和 FLUS 耦合模型, 以 2018 年为基期模拟预测南京市 2025 年和 2035 年不同情景下的土地利用状况 (图 5)。总的来说, 4 种情景下南京市 2025 年和 2035 年土地利用变化较为明显的区域主要集中在北部、南部以及中心城区。具体表现为: ①在自然增长情景 (情景 I) 下, 2025 年和 2035 年城镇用地规模扩张至 1 058.18 km² 和 1 198.49 km², 其他各类土地除其他建设用地和水域外以原有趋势继续发展。②在经济发展情景 (情景 II) 下, 2025 年和 2035 年城镇用地将较情景 I 进一步扩张, 面积分别增至 1 170.07 km² 和 1 329.17 km², 而耕地、园地、林地、其他农用地以及农村居民点等地类面积均进一步减少。③在生态优先情景 (情景 III) 下, 为保护城市生态环境, 到 2025 年和 2035 年南京市城镇用地扩张规模大幅减小, 面积分别增至 959.02 km² 和 987.05 km², 而林地面积则进一步扩张至 735.95 km² 和 776.43 km²。④在协调发展情景 (情景 IV) 下, 城镇用地的面积在 2025 年和 2035 年将分别达到 974.95 km² 和 1 018.92 km², 林地的空间分布均在原有的分布上向外延伸, 且北部的林地扩张尤为突出, 总面积分别增至 722.18 km² 和 761.43 km², 表明采取一定的生态保护政策将对改善生态环境和维护生态平衡起重要作用。同时, 在生态

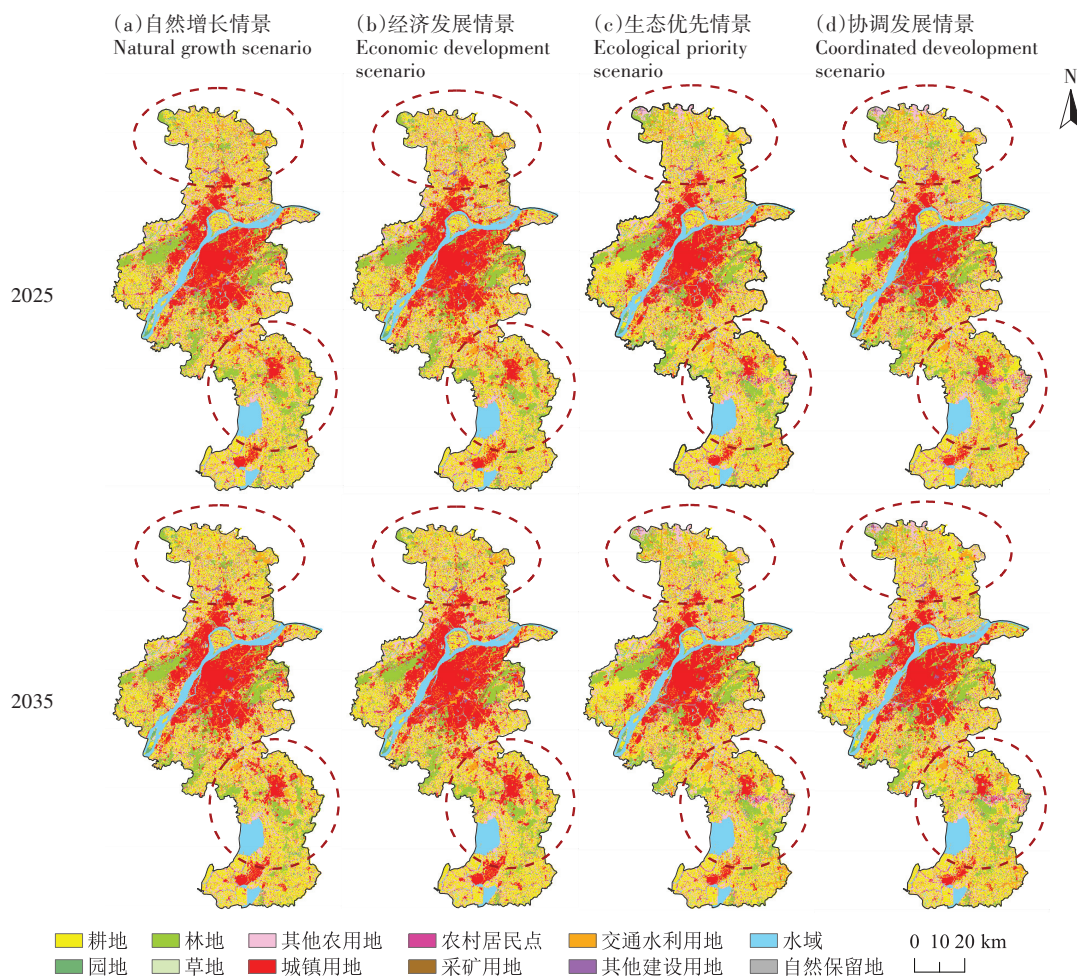
优先和协调发展情景下, 耕地面积均有所增加, 这主要是由于农村居民点大幅减少, 且减少的部分将主要转移至城镇用地、林地和耕地。

2.2 南京市生境质量的时空演变及模拟

2.2.1 2009—2018 年南京市生境质量的时空演变

采用 InVEST 3.9.0 软件中的生境质量模型评估南京市 2009—2018 年生境质量状况, 参考相关研究^[10,34], 将本研究中生境质量评估结果按照 ArcMap 软件中的等距离断裂法 (Equal interval) 划分为 5 类: 高 (0.81~1)、较高 (0.61~0.80)、中 (0.41~0.60)、较低 (0.21~0.40) 和低 (0~0.20)。总体而言, 南京市生境质量处于中等级并呈现持续下降态势, 2009、2014 年和 2018 年的生境质量平均值分别为 0.448 1、0.441 1 和 0.433 4。从图 6 可以看出, 生境质量呈现出低值区持续增加, 高值区持续减少的趋势, 低等级生境质量的面积从 2009 年的 25.88% 增加至 2018 年的 28.39%, 其主要来源于高、中及较低等级区 (图 6d); 而高和较高等级生境质量的面积从 2009 年的 1 365.35 km² 下降至 2018 年的 1 326.26 km²。

从生境质量的空间格局 (图 6) 来看, 具有中心低、外围高、东部低、西部高的总体特征。中心城区的生境质量最低, 呈现出从中心城区向外蔓延且面积不断扩大的趋势, 这主要是因为城镇建设用地迅速扩张, 占用了其他土地类型, 对生境质量造成较大的威胁。此外, 生境质量处于低值的区域, 还零星散落在全市的乡村区域, 空间分布与农村居民点的分布高度



红色虚线圈出部分为不同情景下南京市2025年和2035年土地利用主要变化区域
The red dashed circles show the main land use change areas in Nanjing in 2025 and 2035 under different scenarios

图5 不同情景下南京市2025年和2035年的土地利用模拟预测图

Figure 5 Land use simulation prediction map of Nanjing City in 2025 and 2035 under different scenarios

一致。南部和北部的大部分区域生境质量处于较低等级,这些地区的土地类型主要以水田和旱地为主。中部的南京长江段、南部的石臼湖周边和西部的西华山生境质量处于高和较高等级,主要是因为区域内土地利用以林地和水域为主,受人为干扰影响较小。

2.2.2 基于不同情景的南京市2025年和2035年生境质量模拟

采用CA-Markov和FLUS耦合模型以及InVEST模型对2025年和2035年南京市在4种不同情景下的生境质量进行评估,结果如图7所示。到2025年,自然增长、经济发展、生态优先和协调发展4种情景下南京市生境质量平均值分别为0.425 3、0.417 6、0.436 8和0.440 1,2035年分别为0.416 6、0.405 6、0.439 8和0.444 5。与2018年相比,2025年和2035年南京市的平均生境质量在不同情景下存在差异。在自然增长和经济发展情景(情景I和情景II)下,南京

市平均生境质量未来将进一步下降,而在生态优先和协调发展情景(情景III和情景IV)下,其平均生境质量将上升。

总体来看,4种不同情景下生境质量等级分布差别较大的区域主要是南京市的北部、南部以及中心城区(图7)。生境质量低值区与城镇用地在空间分布上高度一致,即城镇用地的扩张会直接影响该区域内生境质量低值区的分布。此外,水域在不同情景下均在生境质量高值区,而园地、林地、草地尽管在不同情景下模拟预测得到的数量和空间分布有所不同,但都一直处于生境质量高值区。4种情景下,生境质量均值的排序为生态优先情景>协调发展情景>自然增长情景>经济发展情景。具体表现为:①在自然增长情景(情景I)下,与2018年相比(图8),2025年和2035年南京市中心城区生境质量进一步下降,低值区面积占比分别增加1.40个百分点和2.87个百分点,主要是

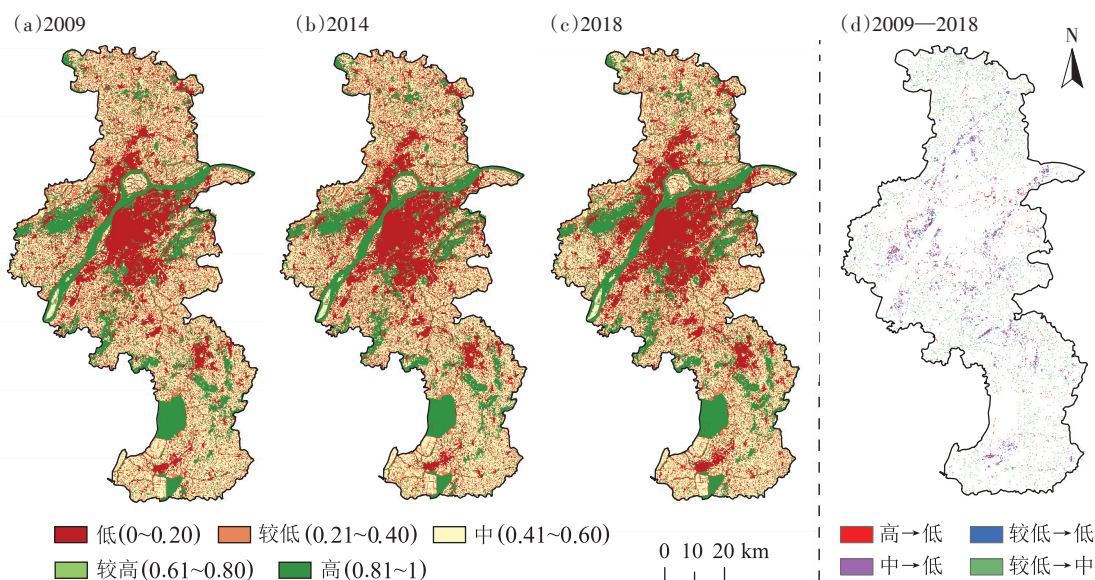
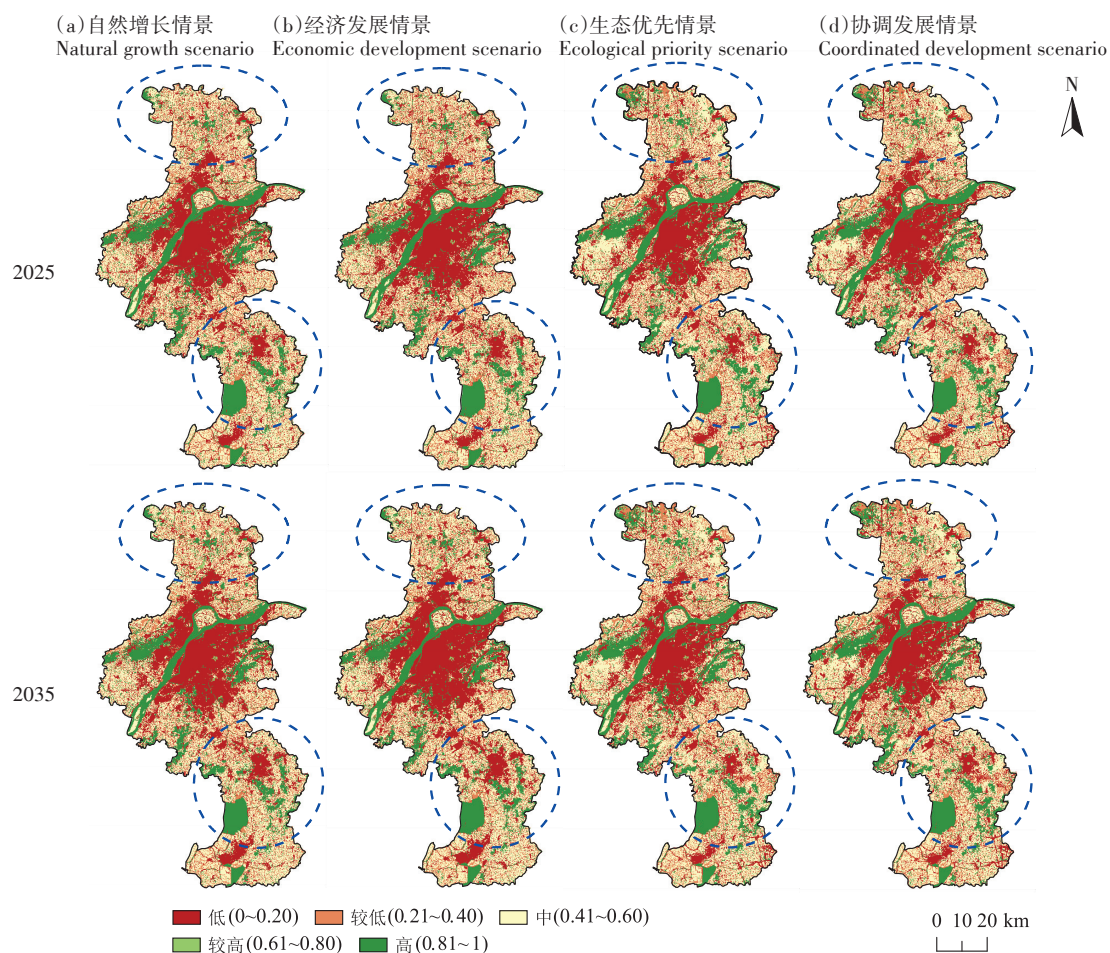


图6 2009—2018年南京市生境质量空间分布及变化图

Figure 6 The spatial distribution and changes of Nanjing's habitat quality from 2009 to 2018



蓝色虚线圈出部分为不同情景下南京市2025年和2035年生境质量主要变化区域

The blue dashed circles show the main areas of habitat quality change in Nanjing in 2025 and 2035 under different scenarios

图7 不同情景下南京市2025年和2035年生境质量的空间分布

Figure 7 The spatial distribution of habitat quality in Nanjing City in 2025 and 2035 under different scenarios

因为南京市未来仍将需要大量城镇用地,以支持城镇化的进一步推进和经济社会的继续发展。②在经济发展情景(情景Ⅱ)下,城市扩张的加速和社会经济的快速发展,使得城镇用地面积迅速增加,同时其他地类面积大幅减少,导致情景Ⅱ下生境质量低值的区域较情景Ⅰ进一步增加,且主要集中在北部和中心城区。与2018年相比,其低值区面积占比到2025年和2035年将分别增加2.67个百分点和4.76个百分点。③在生态优先和协调发展情景(情景Ⅲ和情景Ⅳ)下,区域内平均生境质量均有不同程度的提高,且生境质量较差区域主要集中在城市中心区域。其中,在生态优先情景(情景Ⅲ)下,2025年和2035年南京市生境质量高值区面积占比较2018年分别增加0.40个百分点和1.04个百分点;在协调发展情景(情景Ⅳ)下,生境质量低值区面积到2025年和2035年均有所减少,而高值区面积占比较2018年分别增加0.17个百分点和0.80个百分点(图8)。同时,生态优先和协调发展这两种情景下生境质量高值区增加的区域主要位于林地扩张区。因此,可以说林地这一生境地类在生态优先和协调发展这两种情景下得到了更好的保护。

3 讨论

生境质量是衡量区域生态环境的重要指标,预测区域生境质量的未来变化趋势,可为政府制定保护生态环境、防止区域生态质量恶化及合理配置自然资源管理等相关政策提供科学依据^[16]。本研究基于对不同情景下南京市生境质量的未来趋势模拟发现,在生态优先和协调发展情景(情景Ⅲ和情景Ⅳ)下,南京市生境质量到2025年和2035年将会上升,主要由于在情景Ⅲ和情景Ⅳ下,严格执行生态保护政策的同时,

进一步降低城镇用地的扩张速度,可使南京市的生态环境得到改善,从而提升生境质量。而在以自然增长和经济发展情景(情景Ⅰ和情景Ⅱ)为主要趋势的土地利用模式下,其生境质量将进一步下降,主要是由于在情景Ⅰ和情景Ⅱ下,城市经济仍将采用高耗地的粗放发展形式,进而导致城镇用地的需求增加;城镇用地的扩张与生境质量低值区的扩大具有高度的一致性,因此,南京市生境质量下降的趋势将进一步加强。为改善南京市未来的生境质量状况,提升生态系统的服务功能,本研究提出以下建议:①采取严格的生态保护政策对提高城市生境质量具有促进作用(如情景Ⅲ和情景Ⅳ),因此,应进一步贯彻生态文明建设理念,严格执行生态红线管控及相关生态保护政策,在保护现有生态用地不减少的同时,增加国土空间综合整治和生态修复力度,优化园地、林地、草地和水域等生境地类布局;②城镇用地的规模直接影响城市生境质量低值区的分布,从而影响城市总体的生境质量。因此,在编制各级国土空间规划时,应合理控制城镇用地总规模,并通过对现有建设用地再开发、再利用等方式开展城市更新,减少对新增建设用地的依赖。

国土空间规划及空间治理政策的制定颁布对于城市土地利用的变化有较大影响。但由于我国空间规划体系的改革,新一轮的《南京市国土空间总体规划(2020—2035年)》尚在编制中,而《南京市土地利用总体规划(2006—2020年)》和《南京市城市总体规划(2011—2020年)》已到期,因此本研究在模拟未来土地利用时对规划因素考虑较少,仅考虑了已经实施的生态保护红线成果。此外,由于政策效果难以量化,因此,模拟土地利用空间格局中并未考虑政策因

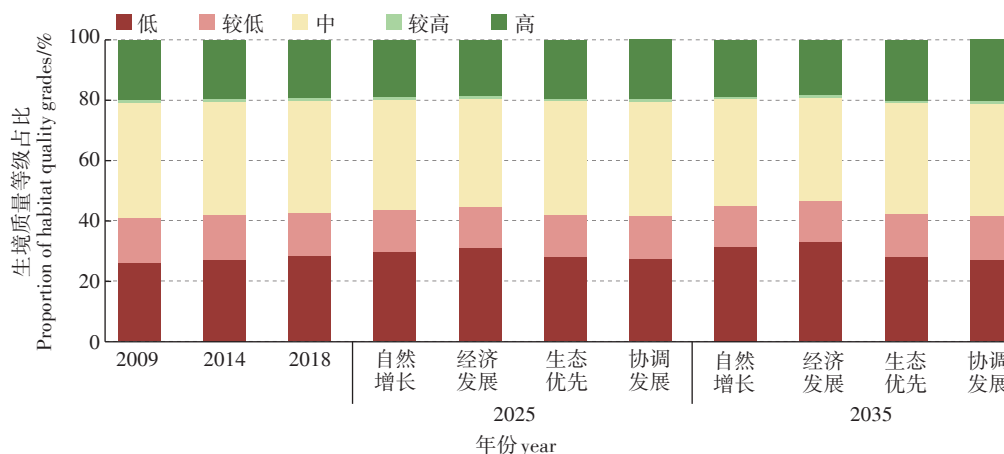


图8 2009、2014、2018年及不同情景下预测的南京市2025年和2035年生境质量等级的面积占比

Figure 8 Area ratio of each habitat quality grade of Nanjing City in 2009, 2014, 2018, 2025, and 2035 as predicted on different scenarios

素,导致模拟精度有所降低,在未来的研究中应进一步改进。

4 结论

本研究基于CA-Markov和FLUS耦合模型模拟了南京市2025年和2035年不同情景下的土地利用情况,采用InVEST模型评估了2009年以来的生境质量,并对其时空演变特征及其在4种情景下2025年和2035年的生境质量变化趋势进行分析。结论如下:

(1)2009—2018年,南京市城镇用地面积增加了223.65 km²,年均增加24.85 km²。2025年和2035年南京市在不同发展情景下,城镇用地扩张幅度存在显著差异,其中在经济发展情景下城镇用地扩张最为明显,其次是在自然增长情景下,而生态优先情景和协调发展情景下,城镇用地增幅均未超过10%。

(2)2009—2018年,南京市生境质量的整体下降与城镇用地的持续扩张密切相关。中心城区生境质量下降尤为严重,北部地区下降程度渐弱。而在4种模拟情景中,生境质量等级分布差别较大的区域主要是在南京市的北部、南部以及中心城区,其生境质量均值的排序为生态优先情景>协调发展情景>自然增长情景>经济发展情景。在自然增长情景和经济发展情景下,2025年和2035年南京市生境质量随着城市扩张规模的不同呈现差异化的下降趋势;在生态优先情景和协调发展情景下,城镇用地面积增速大幅减缓,而林地面积逐渐增加,使得生境质量也逐步提升。因此,进行生态保护和约束城市扩张对提高生境质量具有促进作用。

参考文献:

- [1] KATES R W, PARRIS T M. Long-term trends and a sustainability transition[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2003, 100(14):8062-8067.
- [2] 吕立刚,隋雪艳,汪翔,等.江苏省土地城镇化的空间分异及其主导因素探测[J]. *人文地理*, 2018, 33(4):88-94, 112. LÜ L G, SUI X Y, WANG X, et al. Spatial variation of land urbanization in Jiangsu and dominant drivers[J]. *Human Geography*, 2018, 33(4):88-94, 112.
- [3] XIE H L, ZHANG Y W, DUAN K F. Evolutionary overview of urban expansion based on bibliometric analysis in Web of Science from 1990 to 2019[J]. *Habitat International*, 2020, 95:102100.
- [4] ZHOU B B, LÜ L G. Understanding the dynamics of farmland loss in a rapidly urbanizing region: A problem-driven, diagnostic approach to landscape sustainability[J]. *Landscape Ecology*, 2020, 35(11):2471-2486.
- [5] 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. LIU C F, WANG C. Spatio-temporal evolution characteristics of habitat quality in the loess hilly region based on land use change: A case study in Yuzhong County[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(20):7300-7311.
- [6] 冯舒,孙然好,陈利顶.基于土地利用格局变化的北京市生境质量时空演变研究[J]. *生态学报*, 2018, 38(12):4167-4179. FENG S, SUN R H, CHEN L D. Spatio-temporal variability of habitat quality based on land use pattern change in Beijing[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(12):4167-4179.
- [7] 刘智方,唐立娜,邱全毅,等.基于土地利用变化的福建省生境质量时空变化研究[J]. *生态学报*, 2017, 37(13):4538-4548. LIU Z F, TANG L N, QIU Q Y, et al. Temporal and spatial changes in habitat quality based on land-use change in Fujian Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(13):4538-4548.
- [8] BAI L M, XIU C L, FENG X H, et al. Influence of urbanization on regional habitat quality: A case study of Changchun City[J]. *Habitat International*, 2019, 93:102042.
- [9] 刘方田,许尔琪.基于土地利用的新疆兵团与非兵团生境质量时空演变的对比[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(7):2341-2351. LIU F T, XU E Q. Comparison of spatial-temporal evolution of habitat quality between Xinjiang Corps and Non-corps region based on land use[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(7):2341-2351.
- [10] 刘孟竹,张红娟,王彦芳,等.基于土地利用的北方农牧交错带生境质量研究[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(3):156-162. LIU M Z, ZHANG H J, WANG Y F, et al. Characteristics of habitat quality in the agro-pastoral ecotone of northern China based on land uses[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, 28(3):156-162.
- [11] 江伟康,吴隽宇.基于地区GDP和人口空间分布的粤港澳大湾区生境质量时空演变研究[J]. *生态学报*, 2021, 41(5):1747-1757. JIANG W K, WU J Y. Spatio-temporal evolution of habitat quality in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay area based on regional GDP and population spatial distribution[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(5):1747-1757.
- [12] 朱杰,龚健,李靖业.青藏高原东部生态敏感区生境质量时空演变特征——以青海省河湟谷地为例[J]. *资源科学*, 2020, 42(5):991-1003. ZHU J, GONG J, LI J Y. Spatiotemporal change of habitat quality in ecologically sensitive areas of eastern Qinghai-Tibet Plateau: A case study of the Hehuang Valley, Qinghai Province[J]. *Resources Science*, 2020, 42(5):991-1003.
- [13] 彭建,徐飞雄,吴见,等.典型旅游城市生境质量空间分异及其影响机理研究——以黄山市为例[J]. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(10):2397-2409. PENG J, XU F X, WU J, et al. Spatial differentiation of habitat quality in typical tourist city and their influencing factors mechanisms: A case study of Huangshan City[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, 28(10):2397-2409.
- [14] 黄焕春,运迎霞.基于改进Logistic-CA的城市形态多情景模拟预测分析——以天津滨海地区为例[J]. *地球信息科学学报*, 2013, 15(3):380-388. HUANG H C, YUN Y X. A method of simulation and prediction of urban morphology under multiscenarios[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2013, 15(3):380-388.

- [15] TANG F, FU M C, WANG L, et al. Land-use change in Changli County, China: Predicting its spatio-temporal evolution in habitat quality[J]. *Ecological Indicators*, 2020, 117: 106719.
- [16] 阿依吐尔逊·沙木西, 刘新平, 祖丽菲娅·买买提, 等. 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[J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36(2): 149–159. AYTURSUN X M X, LIU X P, ZULPIYA M M T, et al. Eco-environmental effects of land use conversion in oasis city in western China: A case study of Urumqi[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(2): 149–159.
- [17] LÜ L G, LI Y L, SUN Y. The spatio-temporal pattern of regional land use change and eco-environmental responses in Jiangsu, China[J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2017, 8(3): 268–276.
- [18] RAHIM A. The influence of the calibration interval on simulating non-stationary urban growth dynamic using CA-Markov model[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(3): 468.
- [19] 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. HUANG K, DAI W Y, HUANG W L, et al. Impacts of land use change evaluation on habitat quality based on CA-Markov and InVEST models: Taking Fuzhou new district of Fujian Province as an example[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2019, 39(6): 155–162.
- [20] 张经度, 梅志雄, 吕佳慧, 等. 纳入空间自相关的FLUS模型在土地利用变化多情景模拟中的应用[J]. 地球信息科学学报, 2020, 22(3): 531–542. ZHANG J D, MEI Z X, LÜ J H, et al. Simulating multiple land use scenarios based on the FLUS model considering spatial autocorrelation[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2020, 22(3): 531–542.
- [21] 苏迎庆, 刘庚, 赵景波, 等. 基于FLUS模型的汾河流域生态空间多情景模拟预测[J]. 干旱区研究, 2021, 38(4): 1152–1161. SU Y Q, LIU G, ZHAO J B, et al. Multi-scenario simulation prediction of ecological space in the Fenhe River basin using the FLUS model[J]. *Arid Zone Research*, 2021, 38(4): 1152–1161.
- [22] 张世伟, 魏璐瑶, 金星星, 等. 基于FLUS-UGB的县域土地利用模拟及城镇开发边界划定研究[J]. 地球信息科学学报, 2020, 22(9): 1848–1859. ZHANG S W, WEI L Y, JIN X X, et al. The land use simulation and delimitation urban development boundary in county area based on FLUS-UGB[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2020, 22(9): 1848–1859.
- [23] 欧阳晓, 贺清云, 朱翔. 多情景下模拟城市群土地利用变化对生态系统服务价值的影响——以长株潭城市群为例[J]. 经济地理, 2020, 40(1): 93–102. OUYANG X, HE Q Y, ZHU X. Simulation of impacts of urban agglomeration land use change on ecosystem services value under multi-scenarios: A case study in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration[J]. *Economic Geography*, 2020, 40(1): 93–102.
- [24] 罗紫薇, 胡希军, 韦宝婧, 等. 基于多准则CA-Markov模型的城市景观格局演变与预测——以上杭县城区为例[J]. 经济地理, 2020, 40(10): 58–66. LUO Z W, HU X J, WEI B J, et al. Urban landscape pattern evolution and prediction based on multi-criteria CA-Markov model: Take Shanghang County as an example[J]. *Economic Geography*, 2020, 40(10): 58–66.
- [25] LI F X, WANG L Y, CHEN Z J, et al. Extending the SLEUTH model to integrate habitat quality into urban growth simulation[J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 217: 486–498.
- [26] SONG S X, LIU Z F, HE C Y, et al. Evaluating the effects of urban expansion on natural habitat quality by coupling localized shared socioeconomic pathways and the land use scenario dynamics-urban model[J]. *Ecological Indicators*, 2020, 112: 106071.
- [27] 叶欣, 陈春森, 吕利娜, 等. 城市空间格局演化分析及多情景模拟——以鸡西市鸡冠区为例[J]. 测绘科学, 2020, 45(10): 173–180. YE X, CHEN C S, LÜ L N, et al. Analysis and multi-scenario simulation of urban land spatial pattern evolution: Take Jiguan District of Jixi City as an example[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2020, 45(10): 173–180.
- [28] 荣月静, 张慧, 赵显富. 基于MCE-CA耦合模型的嘉兴市土地利用预测情景下生态敏感性评价[J]. 农业资源与环境学报, 2015, 32(4): 343–353. RONG Y J, ZHANG H, ZHAO X F. Evaluation of ecological sensitivity of land use in Jiaxing City based on MCE-CA model[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2015, 32(4): 343–353.
- [29] 刘玉斌, 王晓利, 侯西勇, 等. 四个时期和模拟情景下2025年黄河三角洲的土地利用格局和生态系统服务价值评估[J]. 湿地科学, 2020, 18(4): 424–436. LIU Y B, WANG X L, HOU X Y, et al. Land use pattern and evaluation of ecosystem service values of Yellow River Delta for 4 periods and in 2025 under simulation scenarios[J]. *Wetland Science*, 2020, 18(4): 424–436.
- [30] 郭建国, 郭晓川, 杨斌, 等. 什么是可持续性科学?[J]. 应用生态学报, 2014, 25(1): 1–11. GUO J G, GUO X C, YANG Y, et al. What is sustainability science?[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(1): 1–11.
- [31] 冯琰玮, 甄江红, 马晨阳. 呼和浩特市生境质量对城市用地扩展的时空响应[J]. 干旱区地理, 2020, 43(4): 1014–1022. FENG Y W, ZHEN J H, MA C Y. Spatiotemporal response of habitat quality to urban expansion in Hohhot City[J]. *Arid Land Geography*, 2020, 43(4): 1014–1022.
- [32] 李胜鹏, 柳建玲, 林津, 等. 基于1980—2018年土地利用变化的福建省生境质量时空演变[J]. 应用生态学报, 2020, 31(12): 4080–4090. LI S P, LIU J L, LIN J, et al. Spatial and temporal evolution of habitat quality in Fujian Province, China based on the land use change from 1980 to 2018[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(12): 4080–4090.
- [33] 邓越, 蒋卫国, 王文杰, 等. 城市扩张导致京津冀区域生境质量下降[J]. 生态学报, 2018, 38(12): 4516–4525. DENG Y, JIANG W G, WANG W J, et al. Urban expansion led to the degradation of habitat quality in the Beijing-Tianjin-Hebei area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(12): 4516–4525.
- [34] SUN X Y, JIANG Z, LIU F, et al. Monitoring spatio-temporal dynamics of habitat quality in Nansihu Lake basin, eastern China, from 1980 to 2015[J]. *Ecological Indicators*, 2019, 102: 716–723.