北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

基于土地利用变化的苏南生境质量与生态红线评估

赵柄婷 王维枫 阮宏华 宁卓 闫珂 陈智立

Assessment of habitat quality and ecological red line in southern Jiangsu Province of eastern China based on land use changes

Zhao Bingting, Wang Weifeng, Ruan Honghua, Ning Zhuo, Yan Ke, Chen Zhili

引用本文:
赵柄婷, 王维枫, 阮宏华, 宁卓, 闫珂, 陈智立. 基于土地利用变化的苏南生境质量与生态红线评估[J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(10):100–111. doi: 10.12171/j.1000–1522.20240121
Zhao Bingting, Wang Weifeng, Ruan Honghua, Ning Zhuo, Yan Ke, Chen Zhili. Assessment of habitat quality and ecological red line in southern Jiangsu Province of eastern China based on land use changes[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(10):100–111. doi: 10.12171/j.1000–1522.20240121

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240121

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于土地利用变化的陕北地区生境质量时空演变及其驱动因素

Spatial–temporal evolution of habitat quality in northern Shaanxi Province of northwestern China based on land use change and its driving factors

北京林业大学学报, 2022, 44(6): 85–95. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210437

阿勒泰地区生境质量的时空演变及其驱动因素

Spatial–temporal evolution of habitat quality in Altay area and its driving factors

北京林业大学学报, 2024, 46(3): 27–39. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230189

基于生境质量构建森林生物多样性保育价值模型

Construction of biodiversity protection value model for forest based on habitat quality

北京林业大学学报, 2020, 42(1): 1–9. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190289

京津冀地区生态基础设施生境质量产业发展耦合协调性分析与预测

Coupling coordination and prediction analysis of ecological infrastructure, habitat quality and industrial development in the Beijing–Tianjin–Hebei region of northern China

北京林业大学学报, 2021, 43(3): 96–105. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200346

基于土地利用的北京市多情景模拟下生态服务价值影响评估

Impact assessment of ecological service value under multi scenario simulation in Beijing based on land use

北京林业大学学报, 2023, 45(5): 14–24. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220351

河北坝上土地利用变化对生态服务价值的影响

Impacts of land use change on ecosystem service value in Bashang Area of Hebei Province, northern China

北京林业大学学报, 2019, 41(8): 94–104. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20180244

DOI:10.12171/j.1000−1522.20240121

基于土地利用变化的苏南生境质量与生态红线评估

赵柄婷[1,2] 王维枫[1,2] 阮宏华[1] 宁 卓[3] 闫 珂[1,2] 陈智立[4]

（1. 南京林业大学生态与环境学院，南方现代林业协同创新中心，江苏 南京 210037；2. 南京林业大学区域生态可持续发展研究中心，江苏 南京 210037；3. 南京林业大学经济管理学院，江苏 南京 210037；4. 南京林业大学林草学院，水土保持学院，江苏 南京 210037）

摘要:【目的】评估和模拟快速城镇化对生境质量的影响，为优化生态红线区和生态敏感区调整提供科学依据，进而优化国土空间规划和加强生态空间管控。**【方法】**以江苏省南部为例，基于 PLUS 模型、InVEST 模型和热点分析等方法，评估 2000、2010、2020 年的土地利用变化规律、生境质量与退化度的时空演变、预测 2030 年的变化趋势，并综合定量评估生态红线区生境质量。**【结果】**(1)2000—2020 年，苏南地区土地利用发生显著变化，主要表现为耕地向建设用地和水域转移；生境质量均值呈下降趋势，空间上形成了东西高，中间低的分布格局；生境退化度呈现“中心低–外部高”的圈层分布。(2)2030 年 3 种土地利用模拟情景中，城镇发展情景下，耕地面积减少最多；生态保护情景下，森林和湖泊得到严格保护；可持续发展情景下建设用地规模得到控制。生境质量均值的排序为生态保护情景 > 可持续发展情景 > 城镇发展情景。(3)热点分析得出，2020 年苏南地区乡镇尺度的生境质量和退化度呈集中分布，城镇中心为冷点区域，热点主要分布在森林和山脉，水域为生境质量的高值区。(4)生态红线区域内的生境质量整体高且相对稳定；在未来预测中，生态保护情景会扩大错位面积，可持续发展情景会降低错位面积。**【结论】**快速城镇化和人类活动剧烈是导致苏南地区和部分生态红线区内生境质量下降的主要原因。

关键词：生境质量；苏南地区；InVEST 模型；PLUS 模型；生态红线

中图分类号：S719；F301.2 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2024)10−0100−12

引文格式：赵柄婷，王维枫，阮宏华，等. 基于土地利用变化的苏南生境质量与生态红线评估 [J]. 北京林业大学学报，2024，46(10)：100−111. Zhao Bingting, Wang Weifeng, Ruan Honghua, et al. Assessment of habitat quality and ecological red line in southern Jiangsu Province of eastern China based on land use changes[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(10): 100−111.

Assessment of habitat quality and ecological red line in southern Jiangsu Province of eastern China based on land use changes

Zhao Bingting[1,2] Wang Weifeng[1,2] Ruan Honghua[1] Ning Zhuo[3] Yan Ke[1,2] Chen Zhili[4]

(1. College of Ecology and Environment, Co-Innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China;
2. Research Center for Regional Ecological Sustainable Development, Nanjing Forestry University, Nanjing 200037, Jiangsu, China;
3. College of Economics and Management, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China;
4. College of Forestry and Grassland, College of Soil and Water Conservation, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China)

Abstract: [**Objective**] In the context of rapid urbanization, the assessment and simulation of impact of rapid urbanization on habitat quality can provide suggestions for adjusting ecological red line areas and ecologically sensitive areas, so as to improve territorial spatial planning and strengthen ecological spatial control. [**Method**] In this study, the spatial and temporal evolution of land use changes, habitat quality, and

收稿日期: 2024−04−21 **修回日期:** 2024−05−21

基金项目: 江苏省林业局揭榜挂帅项目（LYKJ[022]1）。

第一作者: 赵柄婷。主要研究方向：生态系统服务。Email: zhaobingting@njfu.edu.cn 地址：210037 江苏省南京市龙蟠路 159 号生态与环境学院。

责任作者: 王维枫，博士，教授。主要研究方向：森林生态系统管理。Email: wang.weifeng@njfu.edu.cn 地址：同上。

本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn；http://journal.bjfu.edu.cn

habitat degradation degree in 2000, 2010, and 2020 were assessed using the InVEST model and hotspot analysis in southern Jiangsu Province of eastern China. The PLUS model was used to simulate land use changes from 2020 to 2030 and the InVEST model was used to assess habitat quality according to scenarios. [**Result**] (1) From 2000 to 2020, land use in southern Jiangsu Province underwent significant changes, mainly characterized by the transfer of cultivated land to construction land and waters. The average value of habitat quality showed a decreasing trend. Additionally, a spatial distribution pattern emerged, characterized by high quality in the east and west, and low quality in the middle. The degree of habitat degradation showed a radial structure of "low center-high outside". (2) Among the three land use simulation scenarios in 2030, the urban expansion scenario showed the largest decrease in cultivated land area. Under the ecological protection scenario, forests and lakes were strictly protected; the expansion of construction land was controlled under the sustainable development scenario. The ranking of mean values of habitat quality was ecological protection scenario > sustainable development scenario > urban expansion scenario. (3) The hotspot analysis revealed that in 2020, habitat quality and habitat degradation in southern Jiangsu Province showed a concentrated distribution at the township scale, with the town centers being the cold spots, hotspots mainly in forests and mountains, and watersheds being the hotspot areas of habitat quality. (4) Habitat quality within the ecological red line area was overall high and relatively stable. In future projections, the ecological protection scenario expanded the mismatch area, and the sustainable development scenario decreased the mismatch area. [**Conclusion**] Rapid urbanization and intense human activities are the main reasons for decline of habitat quality in southern Jiangsu Province and low habitat quality in the part of ecological red line area. Therefore, optimizing the spatial structure of territory and reducing the impact of human activities on sensitive ecological environment areas are of great significance for improving the habitat quality in southern Jiangsu Province of eastern China.

Key words: habitat quality; southern Jiangsu Province area; InVEST model; PLUS model; ecological red line

生态环境是人类赖以生存和发展的基础，也是社会稳定和持续发展的根本保障[1]。然而，城市、经济与人口的快速发展及其对资源的过度需求，导致全球生态系统功能快速退化，物种生存面临多重威胁[2−4]。生境质量是保障生态系统服务功能实现的前提与基础[4]，也是评估环境提供物种存活条件能力关键环境指标[5]。土地利用变化直观反映了城镇扩张、人类活动与自然系统的相互作用[6]。因此，研究和预测土地利用变化、分析生境质量的时空变化[7]对研究该区域内物种多样性和生态环境等方面具有重要意义[8]。在可持续发展的背景下，评估快速城镇化对生态系统功能的影响对指导政府进行生态工程配置尤为重要。

近年来，对生境质量的研究主要集中在评估、建模和预测等方面[9]。早期研究中，学者们通过实地调查评估区域物种多样性和生境质量[6]，但该方法耗费大量人力物力，逐渐被生态模型替代。InVEST 模型结合了土地利用变化和空间定量评估[10]，且结果具有空间可视性[11]，被广泛用于国家和地区的空间规划[12−13]、生态补偿[14]和风险管理[15]等决策中。随着遥感技术不断进步，图像分辨率提高，模型检测土地利用变化发生位置的精度提高[15]，结合 InVEST 模型与土地利用模型评估区域环境质量的研究越来越广泛[9]。Liang 等[16]提出了一种结合土地扩张和斑块种子的元胞自动机模型，调查推测土地利用变化的原因，模拟未来土地利用变化。目前针对快速城镇化背景下研究区生态空间管理和未来情景下生境质量变化的研究比较少。

《江苏省国家级生态保护红线规划》指出，高生境质量、生态功能极重要区和生态环境敏感区应涵盖于生态保护红线区。因此，评估生态红线政策实施效果时，可以将生境质量作为一个重要的指标。江苏省南部地区（简称苏南，下同）位于长江下游，是该省最发达的区域，也是中国经济最繁荣、现代化程度最高的区域之一[17]。在全面推进生态文明建设背景下，探讨苏南快速城镇化对生境质量的影响具有重要意义，能为江苏省土地规划和环境保护等工作提供理论支持[18]。本研究基于 PLUS 模型和 InVEST 模型，利用 2000、2010 和 2020 年 3 期土地利用数据分析过去和预测 2030 年（城镇发展、生态保护和可持续发展情景）苏南地区土地利用变化与生境质量时空演变趋势；同时在乡镇尺度上结合高质量生境区与生态红线区叠加分析，以期优化红线布局范围，并为苏南地区土地利用规划和生态安全提供决策

支持。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

苏南地区(118°46′ ~ 120°37′N, 31°19′ ~ 32°02′E)位于江苏省南部，地处中国东南沿海、长江三角洲，包含南京市、无锡市、常州市、苏州市和镇江市 5 个地级市，总面积 27.87 × 10^3 km^2。地形以平原、低山、丘陵为主，长江自西向东贯穿全境。以位于常州和镇江交接的茅山为分水岭，东部为水网交织的太湖平原，地势平坦。西部为承担重要生态多样性和水土涵养功能的宜溧山地与宁镇丘陵，地势起伏较大(图 1)。

1.2 数据来源

1.2.1 土地利用数据

2000、2010 和 2020 年的土地利用数据来源于武汉大学制作的中国土地利用数据集(https://zenodo.org/record/5816591)，空间分辨率 30 m，包括耕地、森林、草地、水体、建设用地和裸地 6 种土地利用类型。该数据集精度高[19−20]，被广泛应用于土地利用变化监测[21]和生态风险预估[22]。

1.2.2 生态红线数据

根据 2018 年江苏省政府发布的《江苏省国家级生态保护红线规划》文件所提供的生态红线地理坐标信息，对苏南地区生态红线区进行人工矢量化，以提供准确的生态红线空间位置信息。矢量化后的苏南生态红线区面积约 3.57 × 10^3 km^2，占研究区总面积 13.22%。该地区涵盖了长江、太湖和宜溧山地等重要生态空间保护区域，承担着水源涵养、水土保持和生物多样性保护等关键生态功能。

1.2.3 驱动因子数据

参照土地利用模拟和生境质量的相关研究[22−23]，考虑 PLUS 模型可实现性和研究区概况[22]，以及试验数据的可获取性、显著性和一致性，选取人口密度、国内生产总值(GDP)、到道路距离(铁路、高速公路和省道)、到行政区距离和到水域距离为社会因子数据；年降水量、年均气温为气候因子数据；DEM、坡度和土壤类型为自然因子数据。以上 12 个土地利用变化驱动因子数据均来源于中国科学院数据环境中心(https://www.resdc.cn/)。所有数据严格统一地理坐标系为 WGS_84，空间分辨率为 30 m。

1.3 研究方法

1.3.1 生境质量

InVEST 模型的生境质量模块可评估生态系统为个体和种群提供适宜条件的能力[25]。该模块通过评估不同土地利用类型对威胁源的敏感性以及外部威胁的强度，来衡量生境质量和生境退化的程度[17]。结合研究区域的实际情况，本研究选择耕地、建设用地和裸地作为生境质量的威胁因子[6, 26]，生境威胁因子和对威胁源的敏感性参数详见表 1、2，计算公式

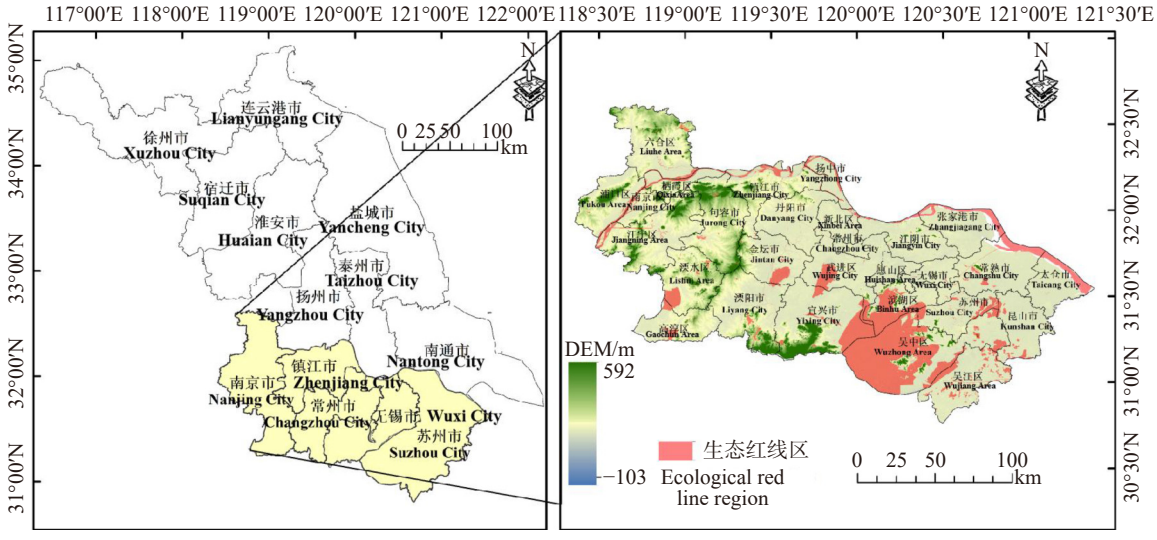


图 1 苏南地区地理位置和生态红线分布

Fig. 1 Geographical location and ecological red line distribution in southern Jiangsu Province

表 1 威胁源的权重和最大影响距离

Tab. 1 Weight and maximum influencing distance of threat source

威胁因素 Threating factor	最大影响距离 Max. influencing distance/km	权重 Weight	衰减类型 Decay type
耕地 Cropland	6	0.35	线性 Linear
建设用地 Construction land	11	0.80	线性 Linear
裸地 Bare land	12	1.00	指数 Exponential

表 2　生境类型对威胁因素的敏感性

Tab. 2　Sensitivity of habitat types to threat factors

生境类型 Habitat type	生境适宜性 Habitat suitability	耕地 Cropland	建设用地 Construction land	裸地 Bare land
耕地 Cropland	0.5	0.3	0.5	0.6
林地 Forest land	1.0	0.4	0.6	0.7
草地 Grassland	0.9	0.4	0.6	0.7
水域 Waters	0.9	0.6	0.8	0.9
建设用地 Construction land	0	0	0	0
裸地 Bare land	0	0	0	0

详见参考文献 [23−26]。

1.3.2　PLUS 模型

PLUS 模型是中国地质大学（武汉）高性能空间计算智能研究所提出的基于栅格数据的土地利用模拟模型[23]，它结合了土地扩张分析策略和基于多类型随机斑块种子的 CA 模型[16]，研究驱动因素与土地利用变化之间的关系，使用自适应系数调控土地利用斑块数量的变化。该模型能反映区域土地利用竞争力和实现未来土地利用模拟。本研究利用 LEAS 模块挖掘 2000—2020 年土地利用变化的驱动因素，使用 CARS 模块模拟未来 10 年土地利用变化；基于 2020 年模拟结果和 2020 年实际土地利用数据，选择 Kappa（K）系数和 FoM（figure of merit）指数评估模拟结果精度。

$$A_{\mathrm{o}}=\frac{\sum_{i=1}^{n}A_i}{N} \tag{1}$$

$$K=\frac{A_{\mathrm{o}}-A_{\mathrm{E}}}{(1-A_{\mathrm{E}})} \tag{2}$$

式中：A_{o}为分类的总体准确度，表示模拟结果与每个随机样本的土地利用数据一致的概率；A_{E} 表示模拟结果与当前土地利用数据相吻合的概率。n 为样本总数；A_i为第 i 个土地利用类型的正确分类样本数。K 取值范围为−1 到 1，数值越大，说明模型越准确。

$$\mathrm{FoM}=\frac{1}{\max\{N_{\mathrm{e}},\ N_{\mathrm{d}}\}}\sum_{q=1}^{N_{\mathrm{d}}}\frac{1}{(1+\beta d(q)^2)} \tag{3}$$

式中：N_{e}代表模拟土地利用的像元数量；N_{d}代表实际土地利用的像元数量；β是大于 0 的比例系数，通常为 1/9；$d(q)$是第q个检测到的实际土地利用当前像素与最近的模拟像元之间的距离。一般来说，FoM值通常在 0.1 和 0.3 之间[27]。

1.3.3　情景设定

参考相关文献[8,23]，综合考虑江苏省当前发展情况和未来社会经济发展规划，利用 Markov 模型，设置 3 种土地利用情景：城镇发展情景（2030 Ⅰ）、生态保护情景（2030 Ⅱ）和可持续发展情景（2030Ⅲ）。以 2020 年土地利用为基准年数据，邻域影响因子如表 3 所示，土地利用转移矩阵如表 4 所示。

（1）邻域影响因子。邻域影响因子反映了不同土地利用类型之间以及它们与邻近区域内其他土地利用类型间的相互作用程度，值域 [0，1]，越接近 1 则代表该地类受附近单元地类的影响力越强，扩张能力越强[23]。参考相关研究[24]，经过调试确定最终各地类的邻域影响因子参数如表 3。

（2）转换成本与限制变化区域设置。转换成本矩阵是指允许该类型地类转入或转出；制变化区域即禁止此区域的地类发生变化[8,23]。各情景的转移成本矩阵如表 4 所示。

1.3.4　热点分析

采用热点分析工具[6, 11]探究苏南地区生境质量与生境退化度的空间分布特征，探究其是否具有高值（热点）区域集中和低值（冷点）区域集中分布的现象。使用空间统计工具，基于 Getis-Ord Gi 指数，提取乡镇区域内的生境质量和生境退化度的均值并分

表 3　邻域影响因子参数

Tab. 3　Neighborhood impact factor parameters

土地利用类型 Land use type	耕地 Cropland	林地 Forest land	草地 Grassland	水域 Waters	建设用地 Construction land	裸地 Bare land
城镇发展情景 Urban development scenario	0.5	0.4	0.3	0.4	1.0	0.01
生态保护情景 Ecological protection scenario	0.5	1.0	1.0	0.6	0.2	0.01
可持续发展情景 Sustainable development scenario	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4	0.01

表 4 各情景土地利用转移成本矩阵

Tab. 4 Land use transfer cost matrix of different scenarios

情景设置 Scenario setting	土地类型 Land type	耕地 Cropland	林地 Forest land	草地 Grassland	水域 Waters	建设用地 Construction land	裸地 Bare land
城镇发展情景 Urban development scenario	耕地 Cropland	1	1	1	1	1	0
	林地 Forest land	1	1	1	1	1	0
	草地 Grassland	1	1	1	1	1	0
	水域 Waters	1	1	1	1	1	1
	建设用地 Construction land	0	0	0	0	1	0
	裸地 Bare land	1	1	1	1	1	1
生态保护情景 Ecological protection scenario	耕地 Cropland	1	1	1	1	1	1
	林地 Forest land	0	1	0	1	0	0
	草地 Grassland	0	0	1	1	0	0
	水域 Waters	1	1	1	1	1	1
	建设用地 Construction land	0	0	0	0	1	0
	裸地 Bare land	1	1	1	1	1	1
可持续发展情景 Sustainable development scenario	耕地 Cropland	1	1	1	0	0	0
	林地 Forest land	1	1	1	1	0	1
	草地 Grassland	1	1	1	1	0	1
	水域 Waters	0	0	0	0	0	1
	建设用地 Construction land	1	1	0	0	1	0
	裸地 Bare land	1	1	1	1	1	1

析其空间集聚特征。

1.3.5 空间错位面积指数

为进一步识别高生境质量区域但并未划入生态红线的空间分布[7]和属于生态红线区但生境质量并不高的区域，在乡镇尺度上将生态红线与高生境质量区进行叠加分析，统计二者错位面积[28]。

$$U=|A-B| \tag{4}$$

式中：U 为该区域的空间错位面积；A 为高生境质量面积；B 为生态红线区面积。

2 结果与分析

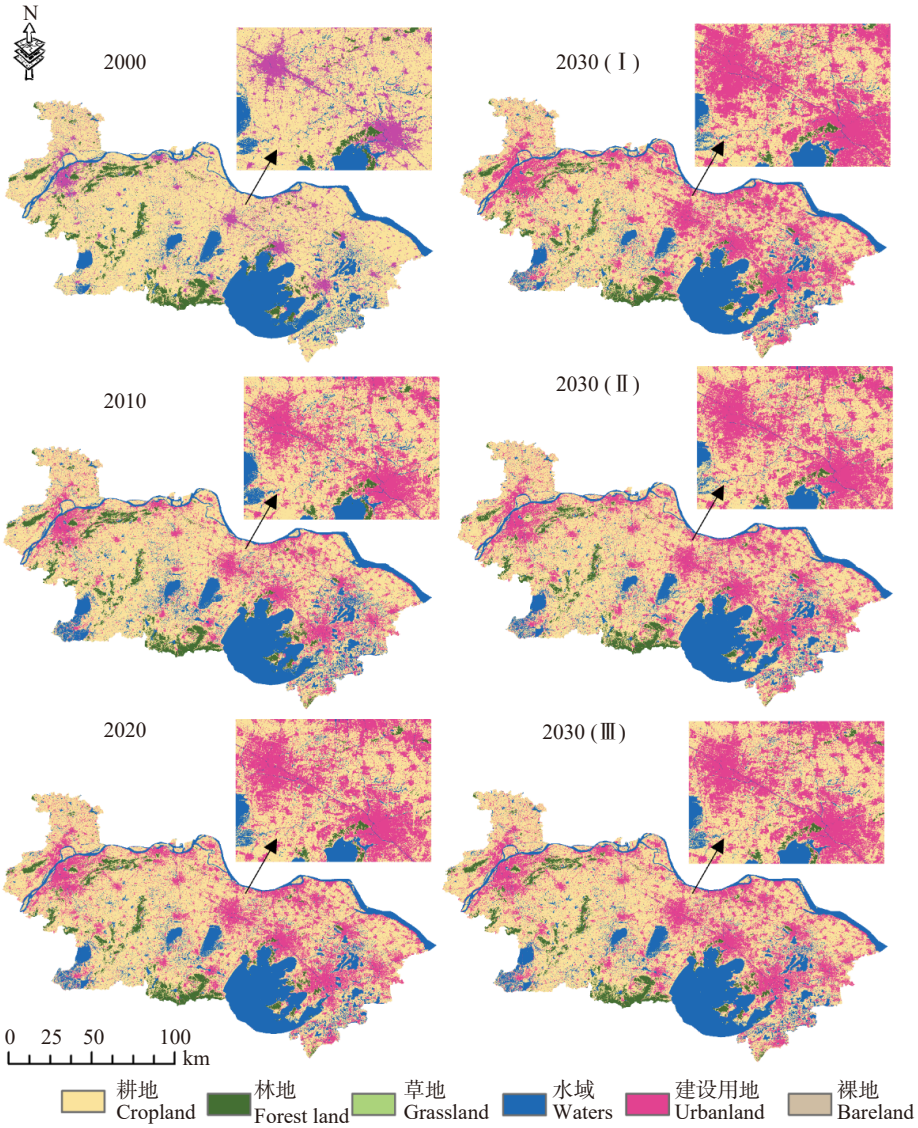
2.1 苏南地区土地利用变化分析

2000—2020 年间，苏南地区土地利用类型以耕地、水域和建设用地为主，森林和草地相对较少（图 2）。土地利用变化以耕地向建设用地和水域转化为主（表 5）。耕地面积从 18.57×10^3 km^2 减少至 15.26×10^3 km^2，在城市边缘分布较为密集，破碎化程度较高；建设用地面积从 2.59×10^3 km^2 增加至 6.34×10^3 km^2，依托原有市中心向外发展（图 2）；水域面积从 5.24×10^3 km^2 减少至 5.10×10^3 km^2，在原有位置上有一定的缩小；森林面积相对较少，集中分布在地势较高区域，如南部的宜溧山地。草地和其他土地类型呈点状零星分布在其他土地利用类型中。2000—2020 年，耕地、水域和森林转换为建设用地的面积分别为 3.64×10^3、186.67、40.98 km^2。

基于 2010 年苏南地区土地利用数据，运用 PLUS 模型对 2020 年的土地利用数据进行模拟，并与 2020 年实际数据进行对比分析。结果显示，FoM 指数为 0.29，Kappa 系数为 0.84，表明 PLUS 模型具有较高精度，在不同情景下能较为精确地反映研究区域的土地利用变化情况。不同情景下 2030 年土地利用存在显著差异（图 2）。与 2020 年相比，城镇发展情景下，建设用地面积明显扩张至 7.08×10^3 km^2，耕地面积减少至 1.39×10^4 km^2，森林和水域面积分别减少 58.41 km^2 和 102.04 km^2；生态保护情景下，耕地和森林面积基本保持不变，建设用地面积减少至 6.19×10^3 km^2，水域面积减少 35.52 km^2；可持续发展情景下，建设用地面积增加至 6.54×10^3 km^2，耕地面积扩张约 267.31 km^2，森林和水域分别减少约 21.57 km^2 和 171.65 km^2。

2.2 2000—2030 年生境质量与生境退化度的时空演变

2000—2020 年生境质量变化与土地利用变化具有一定的空间相关性。2000、2010 和 2020 年苏南地区生境质量平均值分别为 0.46、0.44 和 0.40，生境质量总体呈下降趋势（图 3）；生境质量下降的区域集中分布在各市中心城区的边缘地带，这些区域人类活动相对频繁，建设开发强度高；镇江市西北和南



Ⅰ.城镇发展情景；Ⅱ.生态保护情景；Ⅲ.可持续发展情景。下同。Ⅰ, urban development scenario; Ⅱ, ecological protection scenario; Ⅲ, sustainable development scenario. Same as below.

图 2　2000—2030 年土地利用状况

Fig. 2　Land use status from 2000 to 2030

表 5　2000—2020 年苏南土地利用转移矩阵

Tab. 5　Land use transfer matrix in southern Jiangsu Province from 2000 to 2020　　km^2

2000	2020					
	耕地 Cropland	林地 Forest land	草地 Grassland	水域 Waters	建设用地 Construction land	裸地 Bare land
耕地 Cropland	14 258.67	119.56	0.15	553.54	3 640.77	0.22
林地 Forest land	376.71	1 199.58	0.17	7.06	40.98	0.01
草地 Grassland	0.55	0.11	0.04	0.17	0.64	0.01
水域 Waters	538.75	2.60	0.01	4 516.99	186.67	0.12
建设用地 Construction land	86.70	0.71	0.00	25.43	2 477.79	0.01
裸地 Bare land	0.03	0.00	0.01	0.02	0.05	0.00

部的宜溧山地森林资源丰富，生境质量较高且相对稳定。

利用 ArcGIS 的自然断点法将生境质量的值划分为 5 个等级[12]（表 6）。苏南地区高和较高生境质量区域的面积呈下降趋势，从 2000 年的 $6.88 \times 10^3\ km^2$ 降低到 2020 年的 $6.57 \times 10^3\ km^2$。而低生境质量面积显著增加，面积从 2000 年的 $3.23 \times 10^3\ km^2$ 扩张到 2020 年的 $7.69 \times 10^3\ km^2$。从空间分布来看：2000—

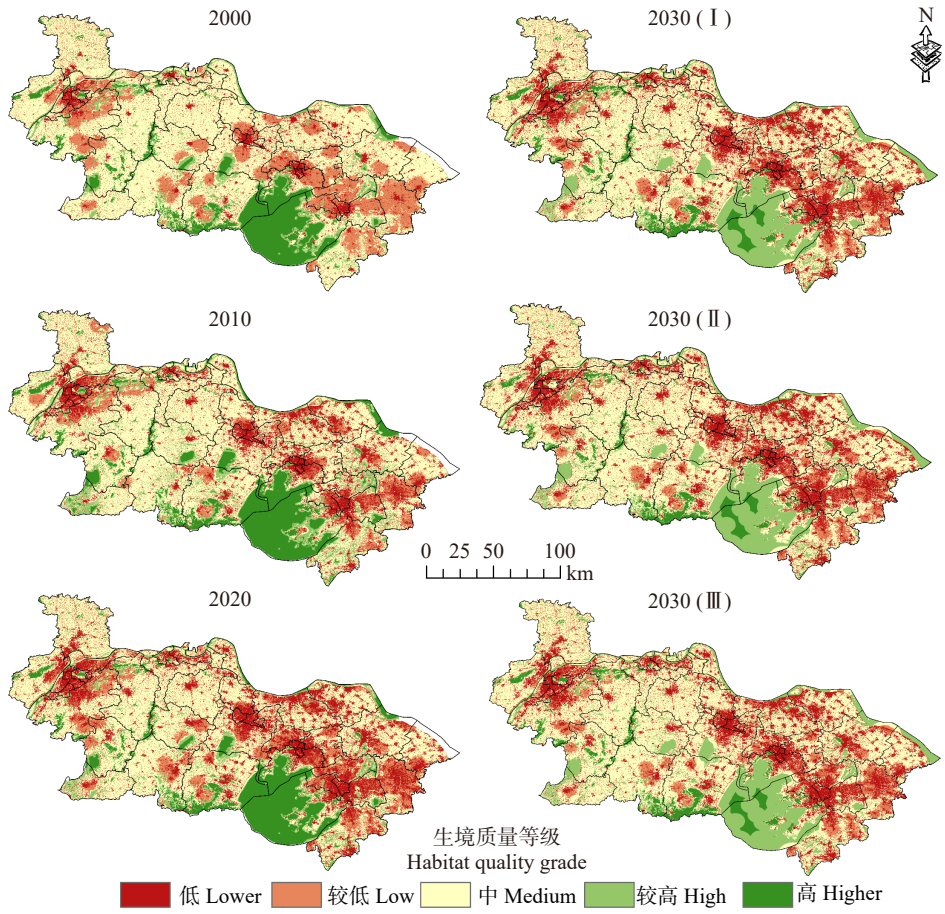


图 3 苏南 2000—2030 年生境质量时空演变

Fig. 3 Spatial and temporal evolution of habitat quality in southern Jiangsu Province from 2000 to 2030

表 6 2000—2030 年苏南地区生境质量各等级面积与占比变化

Tab. 6 Area and percentage changes of habitat grade in southern Jiangsu Province from 2000 to 2030

生境质量等级 Habitat quality grade	2000		2010		2020		2030(Ⅰ)		2030(Ⅱ)		2030(Ⅲ)	
	面积 Area/km²	占比 Proportion/%	面积 Area/km²	占比 Proportion/%	面积 Area/km²	占比 Proportion/%	面积 Area/km²	占比 Proportion/%	面积 Area/km²	占比 Proportion/%	面积 Area/km²	占比/% Proportion
低 Lower	3 231.61	9.66	5 848.67	17.49	7 698.09	23.02	8 819.19	26.37	7 219.20	21.58	7 954.19	23.78
较低 Low	5 210.06	15.57	2 514.76	7.51	3 380.43	10.11	4 802.21	14.35	3 514.81	10.51	3 806.20	11.38
中 Medium	18 125.32	54.19	17 475.41	52.25	15 793.39	47.23	14 627.09	43.73	16 122.16	48.21	15 959.26	47.72
较高 High	2 721.01	8.14	3 240.21	9.68	2 618.71	7.83	2 457.38	7.35	2 341.49	7.00	2 457.38	7.35
高 Higher	4 154.35	12.42	4 363.29	13.05	3 951.72	11.81	2 736.48	8.18	4 244.68	12.96	3 265.31	9.76

2020 年间，低生境质量和较低生境质量主要在新建城区及其周边，可能是因为南京、“苏锡常”两大都市圈的扩张使低生境质量区域蔓延式发展。高生境质量区域无明显空间变化，其主要分布在河湖和苏南南部的丘陵地带。

2030 年生境质量与 2020 年相比：在城镇发展情景下，低生境质量面积增加 1.12×10^3 km²(3.35%)，高生境质量面积下降 1.21×10^3 km²(3.63%)。相比城镇发展情景，在生态保护情景下，2030 年中生境质量和高生境质量的面积分别增加 1.50×10^3 km²(4.47%)和 1.51×10^3 km²(4.50%)；可持续发展情景下，中生境质量增加 1.33×10^3 km²(3.98%)，低生境质量面积减少 865.00 km²(2.58%)。空间分布上，低生境质量面积主要出现在原城市边缘地带。

生境退化度具有时空异质性，呈现较为明显的“辐射式”结构(图 4)。2000—2020 年存在以建设用地“低退化”为中心，向外呈现“较高退化–高退化–中等退化–较低退化”的分布结构，其主要分布在南京市和“苏锡常”3 市中心城区。2020—2030 年主要存在两种结构。第 1 种由中心向外呈现“低退化–较低

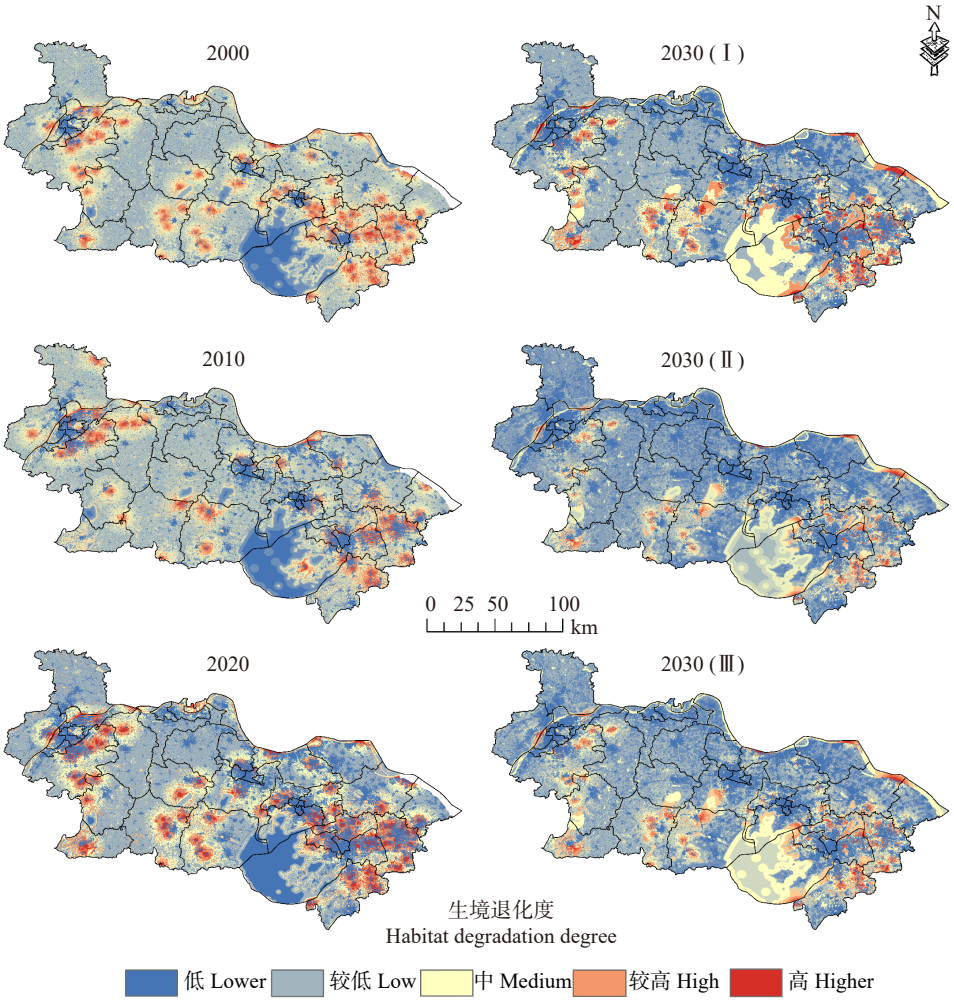


图 4　苏南 2000—2030 年生境退化度时空演变

Fig. 4　Spatial and temporal evolution of habitat degradation degree in southern Jiangsu Province from 2000 to 2030

退化”的分布，主要在森林和山脉附近。第 2 种结构主要分布在长江、太湖等生态保护红线区域，呈现“高退化–低退化–中等退化”。

2.3　生境质量与生境退化热点分析

由于 2000、2010、2020 年研究区生境质量和生态退化度的空间分布总体相似(图 5)，本研究以 2020 年生境质量与生境退化度(乡镇尺度上)为例，发现这两者的冷热点在乡镇尺度上呈现集中分布。生境质量的热点区域位于苏南南部和中部等生境质量较高的区域，如太湖、宜溧山地和茅山地区；其他大部分区域(64.37%)为次热点。生境质量冷点区域主要集中在各市中心等生境质量较低区域，主要冷点集中在南京与苏州市中心区域，次冷点主要分布在无锡与常州市中心区域。生境退化的热点分

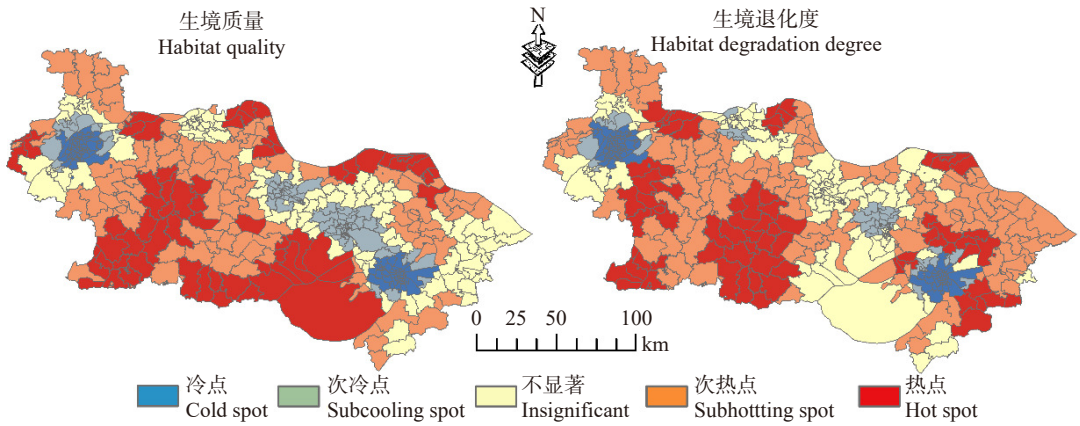


图 5　苏南 2020 年生境质量与生境退化度热点分析

Fig. 5　Hot spot analysis of habitat quality and habitat degradation degree in southern Jiangsu Province in 2020

析中，热点区域主要分布在苏南地区中部和东部；而冷点主要分布在各市中心，研究区内大部分区域（70.16%）处于生境退化次热点。

2.4 生态红线生境质量变化

以 2020 年为例，统计研究区当前生态红线区域内生境质量（图 6）。苏南地区生态红线内生境质量均值为 0.66，远高于研究区生境质量均值（0.40）。高生境质量地区主要分布在太湖与苏南丘陵地带，这些地区以湖泊和森林为主，自然资源丰富。同时，这些地区拥有大面积的生态旅游景点，在政策支持和资金投入方面更具优势。生境质量较低的地区主要分布在长江沿岸、湖泊周围与生态红线边缘地带，这些地区往往与城镇、耕地接壤，与生态红线核心区相比，边缘效应更强，人为干扰更加严重。

在乡镇尺度上叠加分析生态红线与生境质量区域，利用自然断点法将错位区域面积与所占该乡镇面积比例划分 5 个等级（图 7）。错位面积较高的区域主要分布在城市中心或周边以及江苏南部地势较高的区域（宜溧山地）。在乡镇尺度上形成的错位面积占比等级，可以一定程度上反映该区域生态红线调整的潜力。比如，无锡市、常熟市和江阴市辖区内的乡镇错位面积较低，调整潜力较小，主要原因在于该区域内生态红线区较少且工厂等建设用地和永久基本农田面积占比较高；溧阳市和宜兴市的生态红线错位面积较高，宜溧山地作为重要的水土涵养和生态多样性保护区，存在大量毛竹、茶园和旅游区，表明该区域有较大调整潜力，后续可结合耕地红线和实地情况对重点区域进行评估。

在乡镇尺度上统计分析 2030 年研究区错位面积与错位面积占比变化（图 8）。相比 2020 年，3 种情景下低等级错位面积和占比均下降明显，高、较高、中和较低等级错位面积和占比增加。城镇发展情景下，中等级的面积和占比增加最少；生态保护情景下，较高等级的面积和比例增加最多；可持续发展情景下，中和较低等级的面积和占比增加最多。

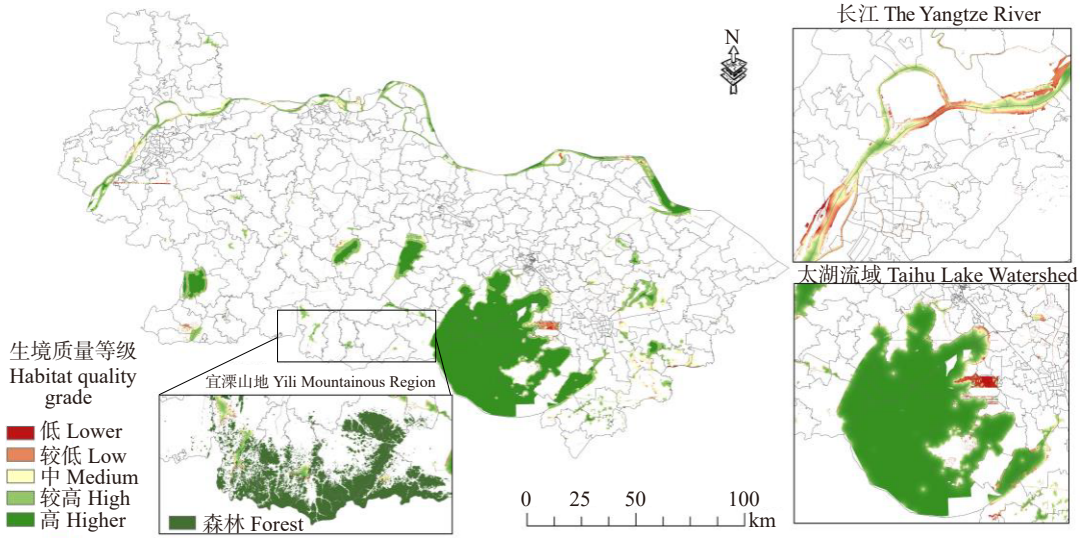


图 6 苏南 2020 年生态红线区域内生境质量等级分布及典型区概况

Fig. 6 Distribution of habitat quality grade and overview of typical areas in the ecological red line area in southern Jiangsu Province in 2020

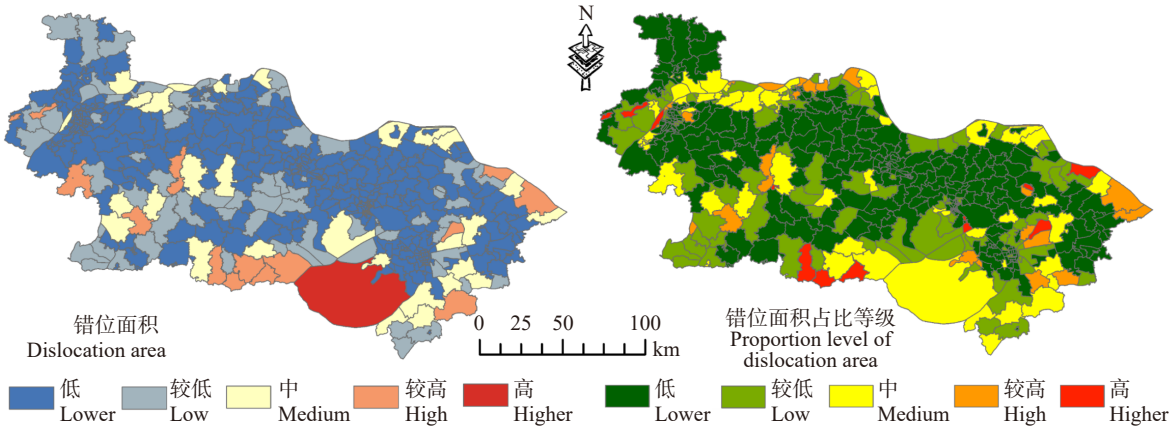


图 7 苏南 2020 年生境质量与生态红线的空间关系分析

Fig. 7 Analysis of spatial relationship between habitat quality and ecological red line in southern Jiangsu Province in 2020

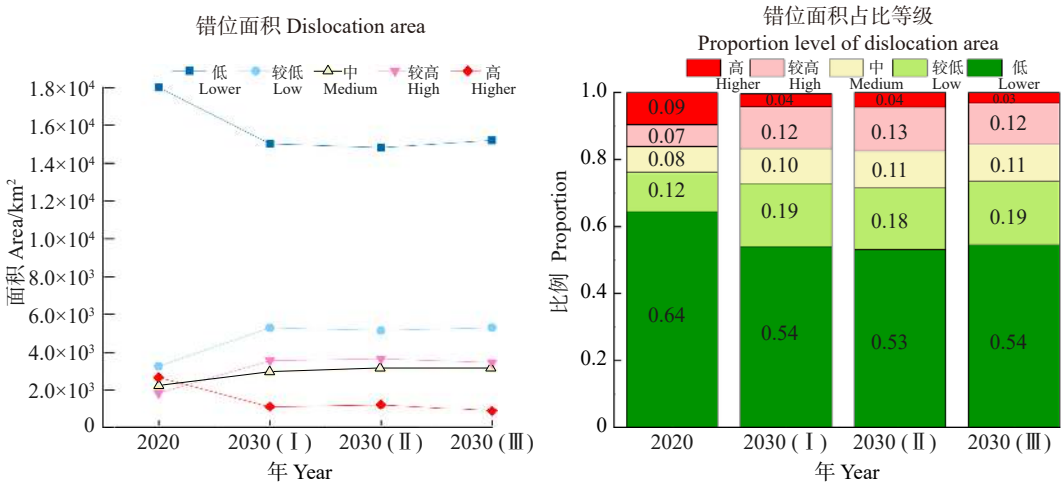


图 8　2020—2030 年生态红线区错位面积统计

Fig. 8　Statistics in ecological red line dislocation area from 2020 to 2030

3　讨　　论

2000—2020 年，苏南地区土地利用类型的转变主要是耕地转为建设用地，发生在城市的边缘地带。这一转变的主要驱动力是过去 20 年大量乡村和外来人口向城市迁移，导致住房需求激增，城镇开发行为频繁。这些因素促进农村自留地向城镇用地的转换，进而导致生境质量下降和生境退化。2000—2020 年中等生境质量面积减少，较低生境质量面积增加，生境质量下降区域与各市人类活动相对频繁[6]、土地利用变化剧烈以及城镇化程度较高[20]的区域在空间分布上呈现高度一致性。而南部宜溧山地、中部的老山和宁镇山脉等以森林为主的自然保护区，生境质量较好且相对稳定。

2000—2020 年，苏南地区生境退化呈现“辐射式”分布。这一现象主要原因在于城市中心区域多为建设用地，生境被严重破坏，继续退化可能性较低，因而表现为“弱退化”。随着城市化进程推进，靠近市中心区域的生境受到的威胁增大，退化严重从而呈现“强退化”。随着与市中心的距离增加，生境受到的威胁减弱，生境退化程度相应降低。苏南地区人口密集、耕地广布广泛，且受人类活动影响较大，生境多处于“中等退化”或“较弱退化”，这与京津冀地区[28]和福建省[12]生境退化规律一致。模拟未来不同情景下苏南地区土地利用变化发现，对比城镇发展情景，可持续发展情景在严格执行生态保护政策的同时，也能保证城镇用地扩张，相对满足 5 市人口和 GDP 增长需要，防止城镇无序蔓延；生态保护情景下，进一步降低城镇用地扩张速度，提高生境质量，减缓生境质量衰退的速度。

本研究存在一定的不足，InVEST 模型虽较为成熟，但在计算中参数设置具有一定的主观性[29]，参数验证和合理性评估值有待深入探讨。此外，本次研究中未考虑区域性的土地利用规划政策，未来将结合土地利用规划政策，以期得到更精准的生态系统服务功能时空变化。

在综合考量生境质量和土地利用变化的过去与未来评估的基础上，苏南地区生态红线的管控应着重关注以下 3 个关键点：首先，合理划定城镇开发边界，控制城镇建设无序蔓延，特别是对特大城市如南京和苏州，生态红线内的活动应严格审批。其次，保护“母亲河”和优化“太湖丘陵生态绿心”，提升其作为长三角生态绿心重要组成部分的保障功能。最后，坚持以保护优先，节约集约、紧凑发展，维护生态安全格局。

4　结　　论

本研究探讨了苏南地区 2000—2020 年土地利用变化规律，运用 PLUS 模型预测 2030 年土地利用变化；使用 InVEST 模型评估 2000—2030 年生境质量和生境退化度的变化，并通过空间冷热点分析结合生态红线揭示了生境质量和生境退化度的空间演变特征。（1）2000—2020 年，苏南地区耕地面积大幅减少，建设用地迅速增加，形成了“宁镇”都市圈和“苏锡常”都市圈；生境质量呈下降趋势，表现出东西高、中间低的空间分布特征。建设用地的扩张区域与生境质量下降区域重合。而生境退化度呈现明显都市圈中心低、周围高的圈层结构。（2）对比 2030 年不同情景模拟结果，城镇发展情景下，建设用地无序扩张，中等生境质量区域面积显著减少，低生境质量区域面积增加。在严格执行生态保护政策的生态保护情景下，可降低建设用地扩张速度，并提高生境质量。可持续发展情景下，既能保证城市发展与人口居住条件改善又可确保生态安全。（3）生境质量

与生境退化度在乡镇尺度上表现聚集特征。2020 年生境质量和生境退化度的冷点区域集中在西部的南京市和东部的苏州、无锡市；热点区域则位于城市和河湖的边缘地带；存在热点区域转为次冷点区域，不显著区域转为热点区域的趋势。(4)苏南地区生态红线内生境质量均值较高，较低值区主要分布在河湖流域与红线区边缘；高生境质量区域与生态红线的分布，在各市间也有较明显的差异，因此需要根据实际情况灵活应用不同策略来制定相应“红线”政策。

参 考 文 献

[1] Costanzar R, d'Arge R, Droot de R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. Nature, 1997, 387: 253−260.

[2] Tillensor D P, Ittensor D P, Walpole M, et al. A mid-term analysis of progress toward international biodiversity targets[J]. Science, 2014, 346: 241−244.

[3] 侯焱臻, 赵文武, 刘焱序. 自然衰退“史无前例”, 物种灭绝率“加速”——IPBES 全球评估报告简述 [J]. 生态学报, 2019, 39(18): 6943−6949.
Hou Y Z, Zhao W W, Liu Y X. Natural decline “Unprecedented”, species extinction rate “Accelerated”--IPBES Global Assessment Report Brief description[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(18): 6943−6949.

[4] Liu X P, Liang X, Li X, et al. A future land use simulation model (FLUS) for simulating multiple land use scenarios by coupling human and natural effects[J]. Landscape Urban Planning, 2017, 168: 94−116.

[5] Burkhard B, Kroll F, Nedkov S, et al. Mapping ecosystem service supply, demand and budgets[J]. Ecological Indicators, 2012, 21: 17−29.

[6] 岳文泽, 夏皓轩, 吴桐, 等. 浙江省生境质量时空演变与生态红线评估 [J]. 生态学报, 2022, 42(15): 6406−6417.
Yue W Z, Xia H X, Wu T, et al. Temporal and spatial evolution of habitat quality and ecological red line assessment in Zhejiang Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(15): 6406−6417.

[7] Zhang K L, Liu T, Feng R R, et al. Coupling coordination relationship and driving mechanism between urbanization and ecosystem service value in large regions: a case study of urban agglomeration in Yellow River Basin, China[J/OL]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, 18(15): 26[2024−01−23]. https://www.mdpi.com/1660-4601/18/15/7836.

[8] 张徐, 李云霞, 吕春娟, 等. 基于 InVEST 模型的生态系统服务功能应用研究进展 [J]. 生态科学, 2022, 41(1): 237−242.
Zhang X, Li Y X, Lü C J, et al. Research progress of ecosystem service function application based on the InVEST model[J]. Ecological Sciences, 2022, 41(1): 237−242.

[9] 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 model[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2022, 39(5): 1001−1013.

[10] 黄木易, 岳文泽, 冯少茹, 等. 基于 InVEST 模型的皖西大别山区生境质量时空演化及景观格局分析 [J]. 生态学报, 2020, 40(9): 2895−2906.
Huang M Y, Yue W Z, Feng S R, et al. Spatio-temporal evolution and landscape pattern of habitat quality in Dabie Mountain area of West Anhui Province based on InVEST model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(9): 2895−2906.

[11] 夏楚瑜, 国淏, 赵晶, 等. 京津冀地区生态系统服务对城镇化的多空间尺度动态响应 [J]. 生态学报, 2023, 43(7): 2756−2769.
Xia C Y, Guo H, Zhao J, et al. Multi-spatial scale dynamic response of ecosystem services to urbanization in the Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(7): 2756−2769.

[12] 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 based on land use change in Fujian Province from 1980 to 2018[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(12): 4080−4090.

[13] 樊应凭, 周寅康, 韩博南, 等. 国土空间治理视角下苏南地区农用地生态修复分区 [J]. 农业工程学报, 2022, 38(1): 287−296.
Fan Y P, Zhou Y K, Han B N, et al. Ecological restoration zoning of agricultural land in southern Jiangsu from the perspective of territorial spatial governance[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(1): 287−296.

[14] 徐丹丹, 侯光雷, 董凯凯, 等. 基于参照基准的湿地生物多样性保护成效区域对比评估 [J]. 湿地科学, 2018, 16(2): 120−129.
Xu D D, Hou G L, Dong K K, et al. Comparative assessment of wet land biodiversity conservation effectiveness based on reference criteria[J]. Wet land Science, 2018, 16(2): 120−129.

[15] Veldkamp A, Lambin E F. Predicting land-use change[J]. Agricultural Ecosystem Environment, 2001, 85(1−3): 1−6.

[16] Liang X, Guan Q F, Clarke K C, et al. Understanding the drivers of sustainable land expansion using a patch-generating land use simulation (PLUS) model: a case study in Wuhan, China[J]. Computers Environment and Urban Systems, 2021, 85: 101569.

[17] 喇蕗梦, 勾蒙蒙, 李乐, 等. 三峡库区生态系统服务权衡时空动态与情景模拟: 以秭归县为例 [J]. 生态与农村环境学报, 2021, 37(11): 1368−1377.
La L M, Gou M M, Li L, et al. Spatiotemporal dynamics and scenario simulation of ecosystem service trade-offs in the Three Gorges Reservoir area: a case study of Zigui County[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2021, 37(11): 1368−1377.

[18] 荣月静, 张慧, 王岩松, 等. 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 [J]. 水土保持研究, 2016, 23(3): 82−89 .
Rong Y J, Zhang H, Wang Y S, et al. Evaluation of land use and biodiversity function based on Logistic-CA-Markov and InVEST

model in Nanjing[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23(3): 82−89.

[19] 王耕, 常畅, 韩冬雪, 等. 老铁山自然保护区景观格局与生境质量时空变化 [J]. 生态学报, 2020, 40(6): 1910−1922.
Wang G, Chang C, Han D X, et al. Spatial and temporal changes of landscape pattern and habitat quality in Lao Tie Shan Nature Reserve[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(6): 1910−1922.

[20] 朱志强, 马晓双, 胡洪. 基于耦合 FLUS-InVEST 模型的广州市生态系统碳储量时空演变与预测 [J]. 水土保持通报, 2021, 41(2): 222−229, 239.
Zhu Z Q, Ma X S, Hu H. Spatial-temporal evolution and prediction of ecosystem carbon storage in Guangzhou based on coupled FLUS-InVEST model[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(2): 222−229, 239.

[21] 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.

[22] 胡俊聪, 何华贵, 陈朝霞. 基于 PLUS 模型的土地利用多情景模拟与时空特征分析 [J]. 测绘通报, 2023(10): 28−33.
Hu J C, He H G, Chen Z X. Multi-scenario simulation and spatiotemporal characteristics analysis of land use based on PLUS model[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2023(10): 28−33.

[23] 胥丽, 国朝胜, 罗绍龙. 基于 PLUS 模型和 InVEST 模型的昆明市生境质量研究 [J]. 三峡生态环境监测, 2023, 8(1): 102−112.
Xu L, Guo C S, Luo S L. Study on habitat quality in Kunming City based on PLUS model and InVEST model[J]. Ecological Environment Monitoring of Three Gorges, 2023, 8(1): 102−112.

[24] 刘智方, 唐立娜, 高莉洁, 等. 生态系统服务模型应用的研究 [J]. 环境科学与技术, 2016, 39(增刊 1): 387−392.
Liu Z F, Tang L N, Gao L J, et al. Research on application of ecosystem service model[J]. Environmental Science and Technology, 2016, 39(Suppl.1): 387−392.

[25] Terrado M, Sabater S, Chaplin-Kramer B, et al. Model development for the assessment of terrestrial and aquatic habitat quality in conservation planning[J]. Science of the Total Environment, 2016, 540: 63−70.

[26] 陈永国, 刘维军, 荣月静, 等. 基于土地利用与植被覆盖度的大通北川河源区自然保护区生境质量评估 [J]. 水土保持研究, 2020, 27(6): 332−337, 393.
Chen Y G, Liu W J, Rong Y J, et al. Habitat quality assessment of Datong Beichuan River Source Nature Reserve based on land use and vegetation cover[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(6): 332−337, 393.

[27] 唐健雄, 何庆湖, 刘雨婧. 长三角城市群城镇化质量与规模的时空错位及影响因素分析 [J]. 华中师范大学学报 (自然科学版), 2022, 56(4): 703−716.
Tang J X, He Q H, Liu Y J. Spatial and temporal dislocation of urbanization quality and scale in Yangtze River Delta urban agglomerations and analysis of influencing factors[J]. Journal of Central China Normal University (Natural Science Edition), 2022, 56(4): 703−716.

[28] 肖玲, 姜群鸥, 王美林, 等. 京津冀地区生态基础设施−生境质量−产业发展耦合协调性分析与预测 [J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(3): 96−105.
Xiao L, Jiang Q O, Wang M L, et al. Analysis and prediction of the coupling coordination between ecological infrastructure, habitat quality, and industrial development in the Beijing Tianjin Hebei region[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2021, 43(3): 96−105.

[29] Liu W, Zhan J Y, Zhao F, et al. Impacts of urbanization-induced land-use changes on ecosystem services: a case study of the Pearl River Delta Metropolitan Region, China[J]. Ecological Indicators, 2019, 98: 228−238.

（责任编辑　孟　瑶
责任编委　臧润国）