

1990—2020年南京市城市绿色空间演变特征研究

张锡梅,姜兴丞,朱紫钰,季 骋,缪丽娟*

(南京信息工程大学地理科学学院,江苏 南京 210044)

摘要:借助 Landsat 卫星影像资料,结合 Google Earth Engine 云计算平台,通过随机森林算法,成功提取了南京市城市绿色空间信息。运用 ArcGIS 10.2 对提取结果进行分析,通过 Fragstats 4.2 软件计算景观指数,再采用移动窗口法分析景观指数的空间特征,结果表明:1990—2020 年南京市城市绿色空间面积总体呈现减少趋势,下降幅度达到了 12%。其中,1990—2005 年剧烈减少,2005—2020 年有所缓和;景观破碎化程度正在加剧,景观优势度、景观连通性和聚集性正在降低,景观形状愈发不规则;景观破碎度和异质程度从中心城区向近郊区蔓延,景观空间集聚性在建成区较低,在远郊区相对较高。

关键词:城市绿色空间;随机森林;GEE;景观指数;南京市

中图分类号:Q948.15⁺6

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1001-7380.2024.05.009

城市绿色空间(UGS, Urban Green Space)是指城市环境中所有植被覆盖的区域,它包括了人工和自然植被覆盖的山地、丘陵、水体和荒地等,涵盖了城市绿地、农业用地和水域等非建筑空间^[1]。这一概念最早源于霍华德提出的“田园城市”理论。该理论的核心目标是通过城市绿色空间来降低城市密度,以此减轻工业化和城市化进程中产生的一系列环境问题^[2]。随着时间的推移,城市绿色空间已经成为城市生态系统和人居环境中不可或缺的组成部分^[3]。随着中国城市化进程的加速,城市空间的扩张使得绿色空间日益受到挤压。研究表明,不同规模和等级的城市均出现了城市绿色空间规模急剧减少且在格局上逐渐趋于破碎化的现象^[4-12],这对城市生态环境构成了威胁,成为一个不容忽视的问题^[13]。

目前,关于城市绿色空间演变特征的研究已相当广泛,主要集中在以下几个关键方面:(1)城市绿色空间提取技术研究。研究者们运用最大似然法、随机森林分类或神经网络分类等方法,对城市绿色空间进行精确提取^[14]。随着大数据时代的到来,云计算平台(如 Google Earth Engine)的高效性和准确性优势日益凸显并受到广泛应用^[15-16]。(2)城市绿色空间的面积和结构变化研究。作为城市绿色空

间时空格局定量化研究的基础^[14,17],研究者多基于提取结果,对城市绿色空间面积、组成结构、动态变化等方面进行空间统计分析^[6,11,18]。(3)城市绿色空间的景观格局研究。景观格局方法为量化城市绿色空间的空间异质性提供了重要工具,具体包括景观指数分析^[9]、移动窗口分析^[19]、梯度带分析^[20]等,该类方法在揭示景观破碎化和连通性等景观斑块特征方面尤为高效。尽管如此,当前国内城市绿色空间的研究仍然较为零散,对于长时间序列城市绿色空间演变特征的系统性研究尚需进一步加强。

在“一带一路”与长江经济带战略交汇的关键节点,南京作为南京都市圈的“心脏”正处于快速城市化的发展阶段。作为首批国家园林城市,南京的城市绿色空间演变不仅具有复杂性,也具有典型性。基于此,本研究以南京市为研究对象,借助 Google Earth Engine 平台和长时间序列的遥感影像数据,运用随机森林土地利用分类技术,对 1990—2020 年城市绿色空间进行精确提取,通过统计分析和景观指数分析揭示其时空演变特征。本研究旨在为南京市近 30 a 来绿地政策及其实施效果的评估提供有力的理论依据,从而指导未来城市绿色空间的规划与发展,也为其他地区城市绿色空间变化规律的研究

收稿日期:2024-05-15;修回日期:2024-06-07

基金项目:江苏省高等学校大学生创新创业训练计划项目(202310300075Y)

作者简介:张锡梅(2003—),女,安徽六安人,本科生。主要从事土地系统变化研究。

*通信作者:缪丽娟(1988—),女,江苏南通人,副教授,博士,硕士生导师。主要从事气候变化与土地利用研究。

究提供借鉴方法和实践案例。

1 研究区概况

南京市是江苏省省会城市,坐落在中国沿海开放带与长江流域开发带的交汇点,不仅是长江三角洲的重要特大城市,也是一座拥有丰富历史与文化底蕴的现代化都市。行政区划上包括玄武、秦淮、建邺、鼓楼、江宁、浦口、六合、栖霞、雨花台、高淳和溧水 11 个区,总面积约为 6 587 km²,拥有常住人口近 955 万人。南京属宁镇扬丘陵地区,地形以低山缓岗为主,属于北亚热带季风气候区,冬季寒冷干燥,夏季炎热湿润。2022 年,南京市人均公园绿地面积 16.2 m²,建成区绿化覆盖率达 45%,是中国四大园林城市之一,享有“绿都”的美誉。本文的研究范围覆盖南京主城区及其所有辖区。

2 研究方法

2.1 数据及预处理

本研究采用 Google Earth Engine 平台提供的 Landsat 5 和 Landsat 8 地表反射率 1 级产品,其空间分辨率为 30 m,进行了严格的几何精校正和大气校正处理。利用该平台高效的运算处理能力,筛选出了夏季、云量少且影像清晰的数据,以确保研究数据的质量。通过 CFMASK 算法对影像中的云层像元进行识别,并执行云掩膜操作。进一步采用中值合成法对年度影像进行合成,从而获得了能够清晰、完整展现研究区域地表覆盖信息的遥感图像,涵盖 1990 年、1995 年、2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2020 年共 7 个时期的地表反射率信息。

2.2 基于随机森林算法的城市绿色空间提取

本研究依据中国现行的土地分类体系《土地利用现状分类》(GB/T 21010—2017),结合卫星影像的空间分辨率和研究区的实际情况,将土地利用类型划分为城市绿色空间和非绿色空间。其中,城市绿色空间包括耕地、林地、草地、水域,非绿色空间指的是建设用地。利用 Google Earth Engine 云平台和随机森林分类算法,研究对南京市土地覆盖情况进行了精准分类。随机森林分类算法最早由 Breiman 提出,是一种高效的非参数回归方法^[21]。因其鲁棒性高和分类速度快,已成为遥感数据土地利用分类的主流算法之一。Google Earth Engine 中的随机森林分类器通常使用 6 个输入参数,分别是

用于分类的树数、每个节点使用的变量数、构建决策树的随机种子变量、最小叶种群、每个决策树输入变量的袋装分数和出袋模式。本研究在对每期地表反射率影像分类之前,先以由 Google Earth Engine 获取的高分辨率图像作为参考,从 Landsat 影像中采集了足量的耕地、林地、草地、水域、建设用地共 5 种土地覆盖类型的参考样本,将 70% 作为训练样本,30% 作为验证样本。通过多次随机森林试验,确定了每期影像正式分类时的决策树数量,其他参数采用默认值。

研究选取了 Landsat 影像的蓝、绿、红、近红外和 2 个短波红外波段作为特征值,并计算了归一化植被指数(NDVI)、修正归一化水体指数(MNDWI)、归一化建筑指数(NDBI),以增强植被、不透水地表和水体的信息识别能力^[16]。最后,对分类结果计算混淆矩阵进行精度评价,结果显示各年份的总体精度介于 90.9%—95.7%,Kappa 系数介于 0.879—0.944,表明分类结果具有较高的可信度,满足本研究的精度要求。

2.3 UGS 动态变化度计算

利用 ArcGIS 10.2 对 7 个时期的景观面积分布进行了统计。单一 UGS 动态变化度能够表征研究区内一定时间范围内城市绿色空间的动态变化的速率^[1],其计算表达式为

$$P = \frac{S_{ij} - S_{ii}}{S_{ii}} \times \frac{1}{T} \times 100\%$$

式中, P 表示 UGS 面积在某时间段的变化速率; S_{ij} 和 S_{ii} 分别表示 UGS 演变研究期初和研究期末的面积数据; T 为时间间隔。

2.4 景观指数计算与分析

景观指数是空间景观格局的精炼表达,能够有效反映景观的组成和结构,揭示人类活动对景观的影响^[22]。根据前人研究和南京市 UGS 特点^[16,23-24],本研究选取了斑块密度(PD)、最大斑块指数(LPI)、景观形状指数(LSI)和聚合度指数(AI)4 个景观指标,量化分析了 1990 年、1995 年、2000 年、2005 年、2010 年、2015 年和 2020 年南京市 UGS 特征。这些指标计算基于斑块这一基本空间单位,其生态学意义如表 1 所示。在 ArcGIS 10.2 中将矢量图层转换为 30 m×30 m 精度的栅格图层,再利用 Fragstats 4.2 计算 UGS 景观指数。

表 1 景观指标及其生态学意义

景观指标	生态学意义
PD	斑块在单位面积上的斑块数量。反映某一景观类型在景观格局中的破碎度和优势度
LPI	某一斑块类型中的最大斑块占据整个景观面积的比例。有助于确定景观的优势类型,反映人类活动的方向和强弱
LSI	描述景观的形状复杂程度的指标。可用以衡量景观的多样性和异质性
AI	反映某一景观类型斑块间的连通性。取值越小,景观越离散

2.5 基于移动窗口法的景观指数分析

本研究采用移动窗口法,深入探究了南京市 UGS 景观的空间演变过程。基于 Fragstats 4.2,设定合适的取样窗口半径,从左上角开始移动,每移动一格,对窗口内的栅格进行景观指数的数值计算,并赋予中心栅格,最终形成景观指数的连续栅格图。在空间上能够直观地观察 1990—2020 年南京市城市绿色空间景观格局的动态变化过程。本研究通过多次试验确定窗口半径为 1 km×1 km 时的最佳选择,能够清晰地反映南京市 UGS 的景观指数密度。

3 结果与分析

3.1 南京市 UGS 面积变化特征

在对 1990—2020 年期间的 7 期遥感影像进行 UGS 提取后,获取了南京市 UGS 类型分布的基本信

息(如图 1)。结果显示,南京市 UGS 主要由耕地和林地构成,其次是草地和水域。30 a 来,林地面积显著扩张,而耕地面积则显著减少,水域变化相对较小。南京市非绿色空间扩展迅速,表现为自中心城区向南、北两端,并沿江呈扩展蔓延的趋势。UGS 逐渐被非绿色空间侵占,且在空间上被分割,碎片化日益加剧,特别是在中心城区、沿江地区以及近郊区,这一现象尤为明显。然而,得益于南京市独特的“山水城林”格局,林地的分布相对集中,主要分布在紫金山、牛首山、栖霞山、老山等自然区域,并向其外围延伸扩散。草地的分布则沿着林地延伸,并散布于城市的不同区域。这种自然与城市的有机结合,不仅为城市提供了生态服务,也为居民提供了休闲和接触自然的机会。总体而言,南京市 UGS 在面临城市化压力的同时,也展现出了一定的适应性和韧性。

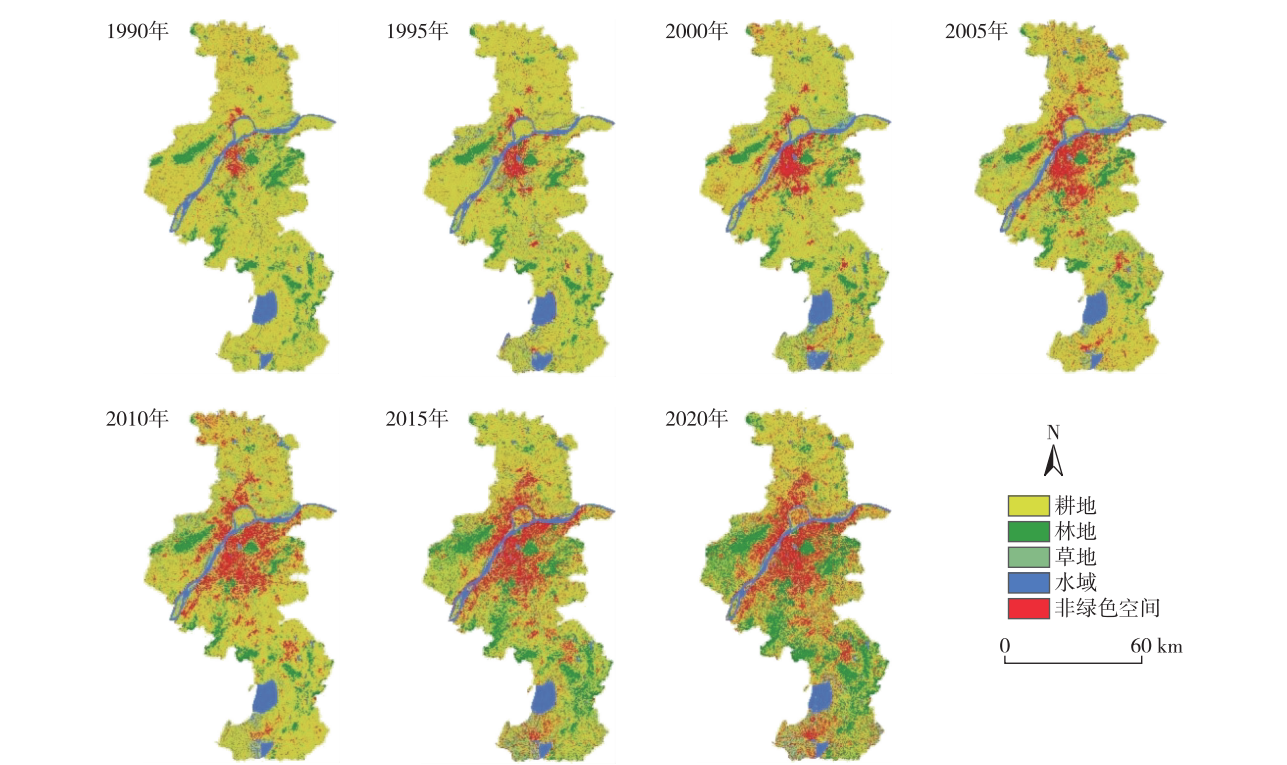


图 1 1990—2020 年南京市土地利用类型分布

对 1990—2020 年南京市 UGS 和非绿色空间面积(见表 2)以及动态变化度(如图 2)进行统计分析。

过去 30 a,南京市 UGS 与非绿色空间具有此消彼长的关系。UGS 呈现出持续缩小的变化趋势,从 1990

年的 6 325 km² 下降至 2020 年的 5 573 km², 减少了约 12%, 动态变化度为 -0.40%。这一变化特征在不同时间阶段表现出显著的差异性。在第 1 阶段(1990—2005 年), UGS 面积共减少 549 km², 动态变化度为 -0.58%, 这一时期内动态变化度的绝对值呈现出快速增长的趋势, 反映了 UGS 缩减的加剧。在第 2 阶段(2005—2020 年), UGS 面积共减少 203 km², 动态变化度为 -0.23%, 绝对值明显小于第 1 阶段, UGS 减少速率减缓, 2015—2020 年 UGS 仅减少了 31 km², 动态变化度仅为 -0.11%。与此同时, 非绿色空间则呈现出显著的扩张趋势, 从 1990 年的 267 km² 扩张至 2020 年的 1 019 km², 增幅接近 3 倍。

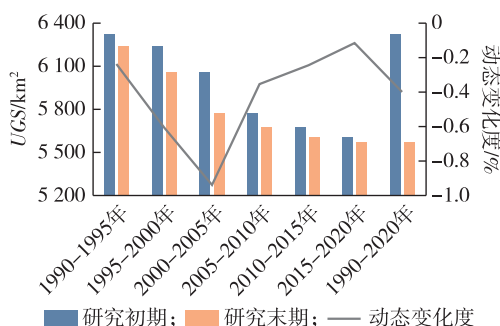


图2 南京市UGS的动态变化

20 世纪 90 年代至 2005 年间, 随着国家改革开放政策的推进, 南京市处于城市化起步阶段, 经济迅速发展, 城市无序扩张, UGS 面积减小量与动态变化度绝对值均在逐时增加, 并在 2000—2005 年这一时期达到峰值, UGS 被挤占的状况空前严峻。此后, 随着南京市推行的“绿色南京”战略的实施, 以及人们生态保护意识的增强, UGS 面积减少幅度

及动态变化度都在逐渐减小。从内部结构变化来看(如表 2), 2010—2015 年, 林地面积的增长尤为显著, 增加了 418 km²。也是在该时期, 耕地的面积却经历了显著的缩减, 减少了 559 km²。这一现象表明, 在南京市 UGS 演变过程中, 尽管近年来政府加大了城市绿化建设和沿江湿地的修复力度, 但这些努力并未能完全抵消耕地大量减少所带来的负面影响, UGS 的整体缩减趋势仍未得到根本扭转。综上所述, 南京市在城市化进程中面临的 UGS 保护与非绿色空间扩张之间的矛盾, 需要通过更为科学合理的城市规划和绿地保护策略来加以解决。

3.2 南京市UGS景观指数演变分析

3.2.1 南京市UGS景观指数时间上的变化 运用 Fragstats 4.2 对南京市不同年份的 UGS 进行景观指数计算, 结果见图 3。1990—2020 年, 南京市 UGS 的 PD 呈现持续增大的趋势, 从 1990 年的 0.12 上升至 2020 年的 0.97, 增幅超过 7 倍, 破碎化程度在显著加剧。其中, 2000—2005 年, PD 值增加最为剧烈, 由 2000 年的 0.31 增大至 2005 年的 0.70, 2015—2020 年, 增加速度趋于平缓, PD 值变化最小, 仅由 2015 年的 0.96 增大至 2020 年的 0.97。LPI 表现为先降低后趋于平缓的整体减少趋势, 由 1990 年的 49.06 减少至 2020 年的 42.26; 在 2010—2015 年间有较小幅度的上升, 但并不显著。这说明在 2010 年以前研究区域内, 人类活动对 UGS 的干扰强度和频率较强, 居民活动及城市扩张对 UGS 进行侵蚀; 2010 年以后, 得益于部分保护措施的实施, 使得 UGS 景观优势度有所改善。

表2 南京市UGS与非绿色空间的面积变化

空间	1990 年	1995 年	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	2020 年
耕地	4 883	4 833	4 591	4 304	4 252	3 693	3 487
林地	547	486	436	470	457	875	879
草地	351	199	318	479	455	469	601
水域	543	729	716	523	510	568	606
UGS	6 325	6 248	6 060	5 776	5 675	5 605	5 573
非绿色空间	267	344	532	816	918	987	1 019

城市绿色空间 LSI 显著上升, 由 1990 年的 44.76 上升至 2020 年的 132.27, 部分时期(2000—2005 年)增幅近 1 倍, 2015 年以后增幅减小。这表明 UGS 景观形状整体愈发不规则, 斑块的边缘越来越复杂, 人类活动的影响不断加剧, 导致其斑块边缘的侵蚀程度加深, 景观异质性和多样性较高。研

究时期内, AI 表现为波动下降趋势, 由 1990 年的 98.35 下降至 2020 年的 94.72, 但在 1990—2000 年、2015—2020 年间, 下降速率明显减缓。这说明总体上, 南京市近 30 a 来, 人类活动频繁, UGS 在空间分布上趋于分散, 景观连通性和聚集性不断下降, 前期较平稳, 后期有缓和的趋势。

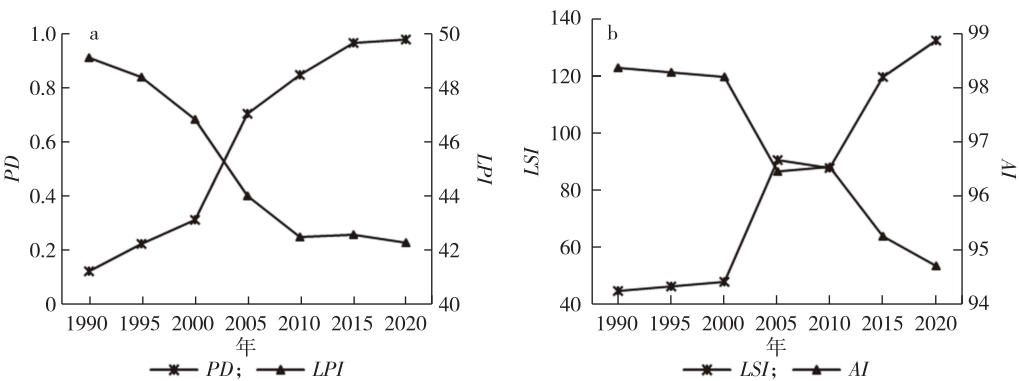


图 3 南京市 UGS 景观指数变化

3.2.2 南京市 UGS 景观指数空间上的变化 运用移动窗口法对南京市 UGS 景观指数进行分析,得到各时期南京市 UGS 景观指数的空间分布图(如图 4—7),读图发现各景观指数的空间变化差异显著。由图 4,5 可知,1990—2020 年,南京市绿色空间 PD 高值区呈现出由中心城区向南部、长江以北地区以及沿江地区逐渐增加并扩展的空间布局,并且 PD 值在 2000—2010 年间增加并扩展的速度最快。PD 高值分布于中心城区及城市扩张所覆盖的地区,说明这些地区 UGS 破碎化程度高,且破碎化呈现出向

四周蔓延趋势,在 2000—2010 年尤为严重。这是由于期间为应对全球金融危机,南京市城市土地扩张、经济建设活动频繁,中心城区扩大,城市区域规模增大。而 LPI 值则表现出与 PD 值相反的趋势,高值分布在建成区以外的郊区,低值分布在中心城区及城市扩张所覆盖的地区,尤其是鼓楼区、玄武区、建邺区、秦淮区等人类活动强度较大且较为频繁的地区。

1990—2020 年,LSI 高值区由建成区内部及城市扩张地区拥江蔓延(如图 6,7)。

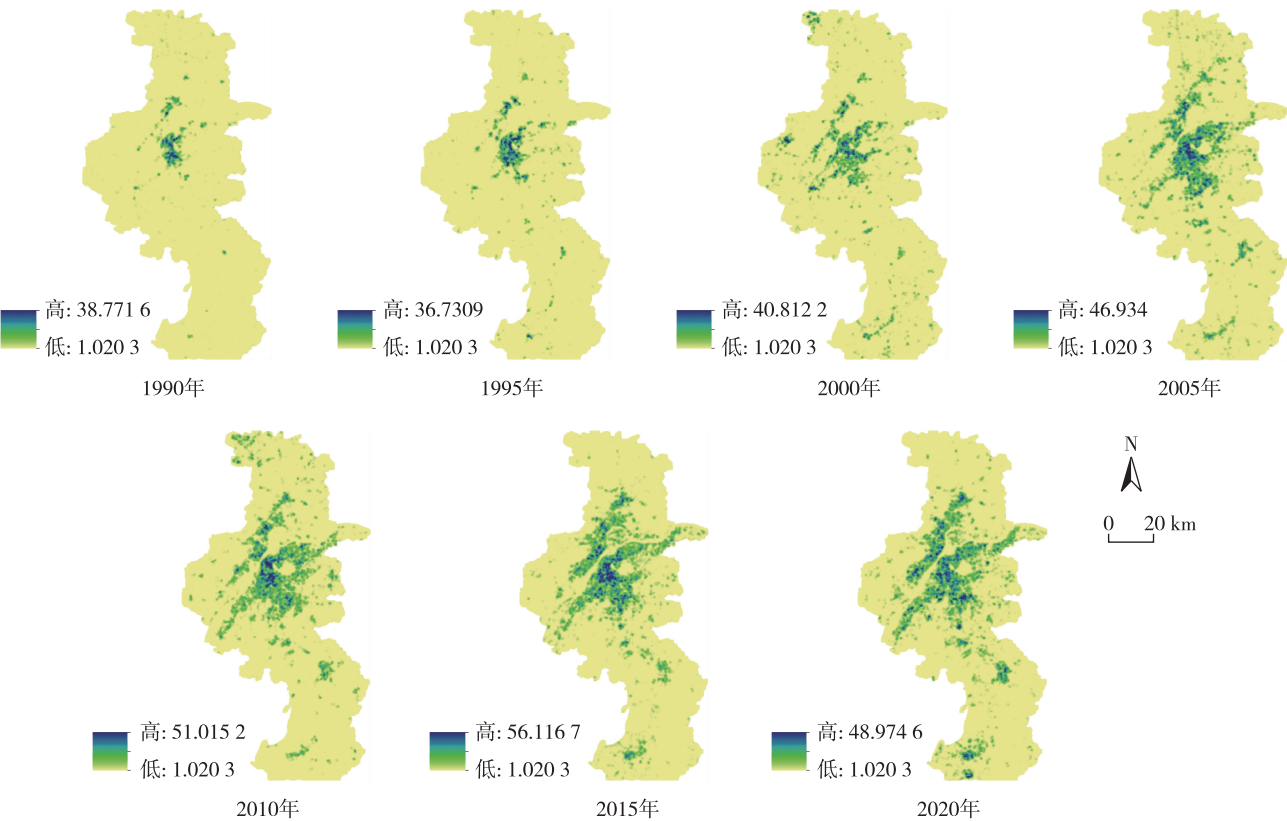
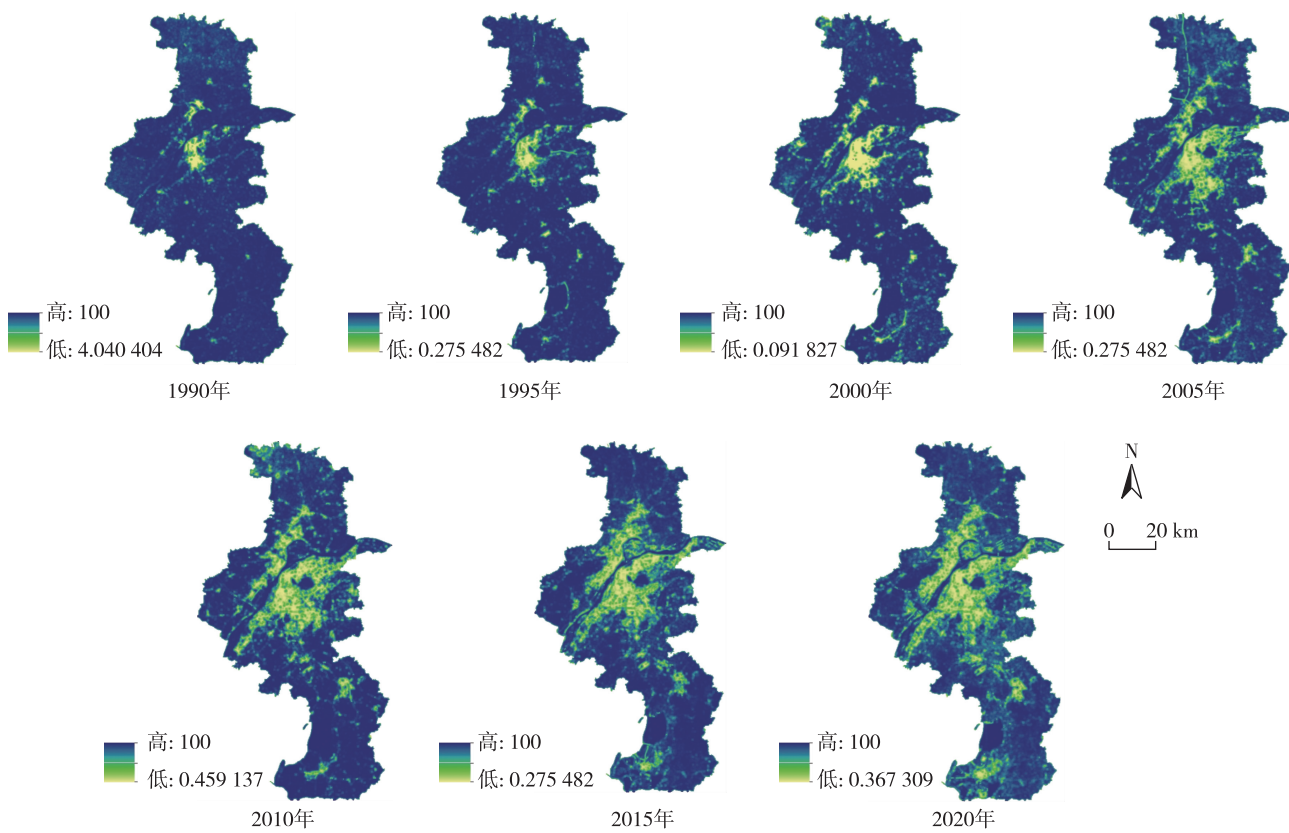
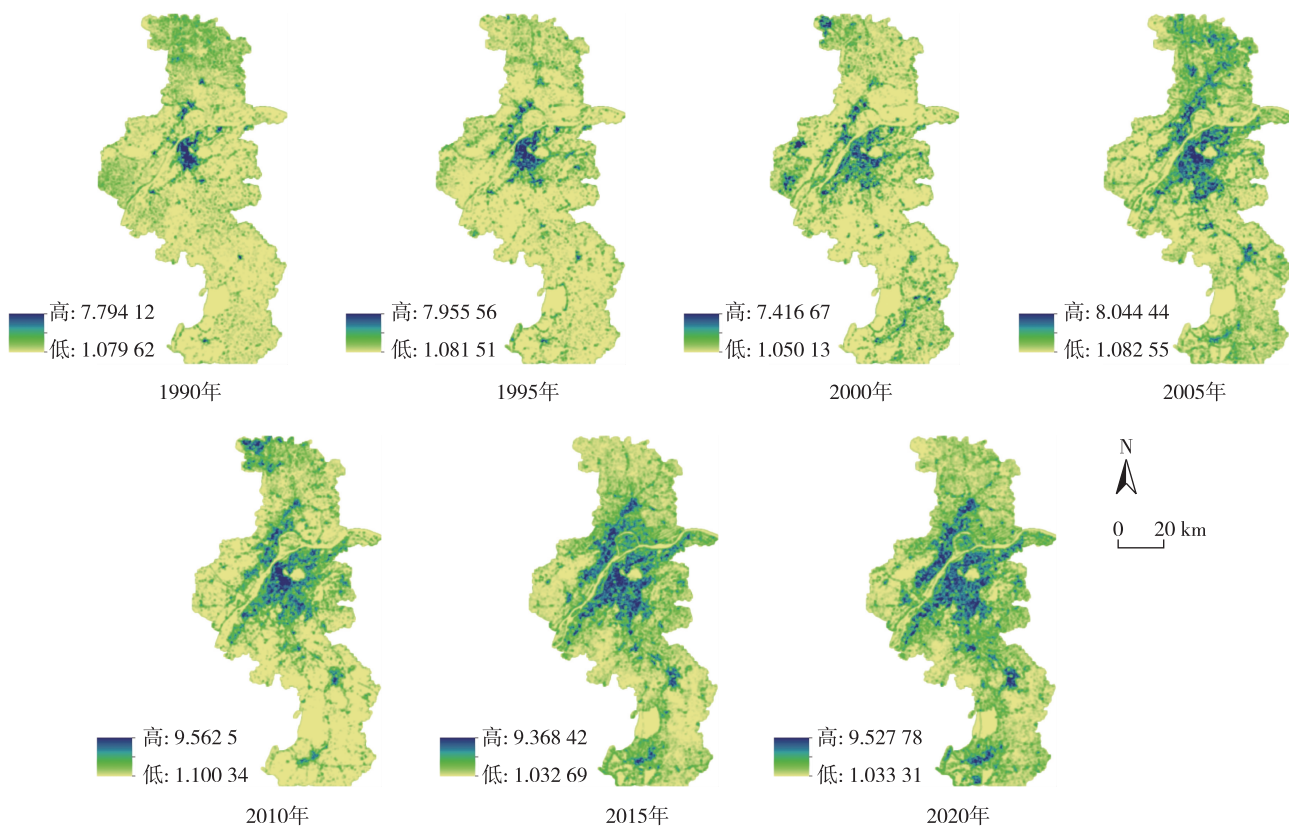


图 4 南京市 UGS 的 PD 的空间分布

图 5 南京市 UGS 的 LPI 的空间分布图 6 南京市 UGS 的 LSI 的空间分布

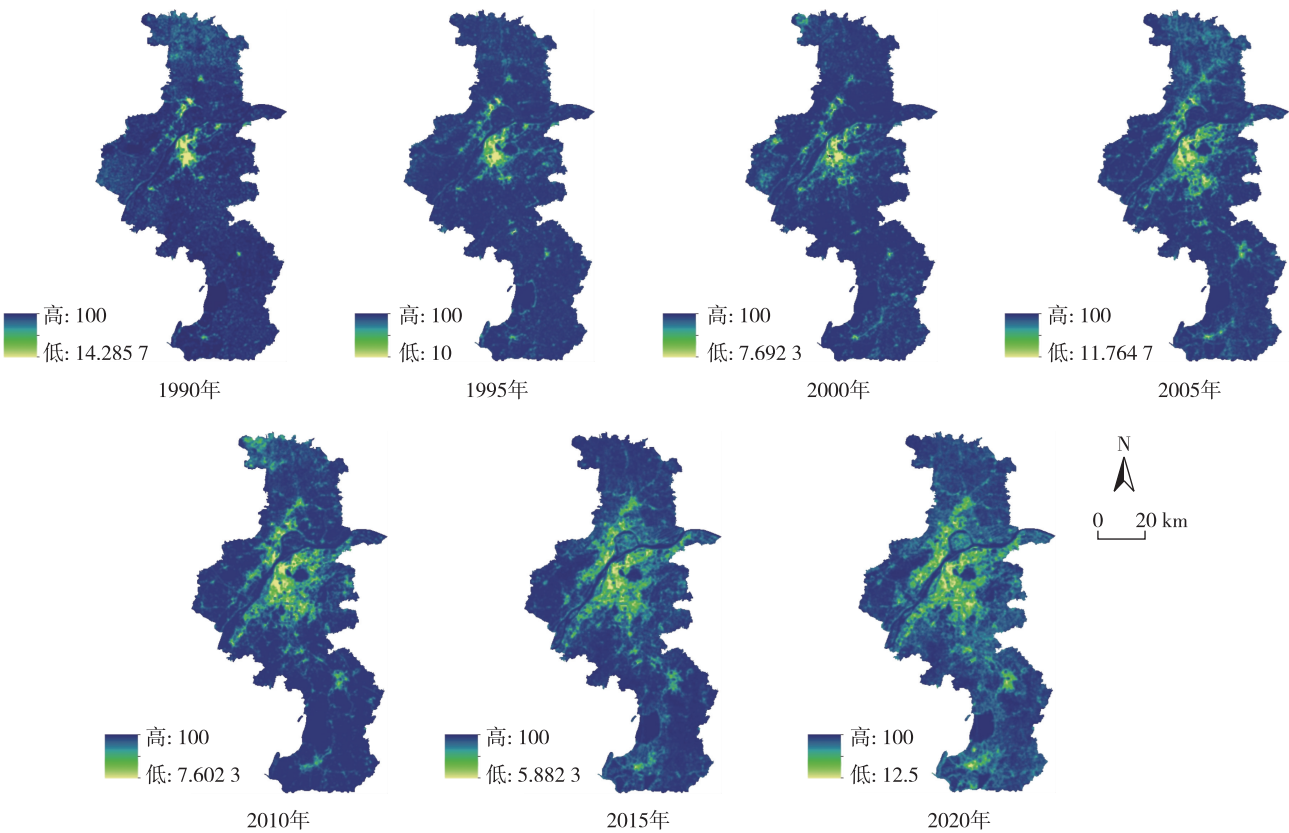


图 7 南京市 UGS 的 AI 的空间分布

从 2005 年起,南京市江北地区(如浦口区),*LSI* 值增长显著,人类活动对景观干扰强烈,景观斑块综合功能减弱。*AI* 低值区集中分布在中心城区和近郊区,面积规模持续缓慢扩大,表明这些地区 UGS 聚集性不断减弱,结构愈发松散,逐渐趋于散状分布。但总体上,*AI* 值在 2010 年以后降低较为缓慢,低值面积的扩张也有所减缓。在远郊区(如溧水区、高淳区、六合区),研究时期内虽有低值扩张的现象,但相对其他区域而言,*AI* 值保持相对稳定的较高水平,表明这些区域景观聚集性和景观连通性较好,人类活动干扰相对较小。

4 讨论

本研究深入探讨了南京市 UGS 的面积和景观格局方面的时空演变特征。分析结果显示,从 1990—2020 年,南京市的绿色空间面积持续减少,在 2005—2020 年间减少的速度有所降低。同时,景观的破碎度和连通度不断降低,在 2015 年以后有缓和的趋势。这与文献[7,18,24]的研究结果相近,但由于各研究对于土地利用类型的划分有所差异,

结果不尽相同。进一步对比发现,南京市 UGS 的演变过程与国内其他经济发达城市(如北京、上海、广州等)具有相通之处^{[4][6-11]},反映出我国城市建设与 UGS 发展路径之间的关联存在一定的共性^[7]。城市化与经济发展是一把“双刃剑”,一方面导致 UGS 逐渐成为一种稀缺资源^[25],造成生态环境问题,另一方面也刺激了建成区内部零星和孤立的微型 UGS 斑块的增加^[26],也为充分发挥 UGS 的生态效益提供资金和技术支持^[27]。此外,前人的研究表明,政策因素从根本上影响 UGS 的发展^[7]。近年来,南京市 UGS 的恢复与建设也得益于政策的指引,如积极响应政府发布的《长江经济带生态环境保护规划》(2017 年),扩大城市湿地面积,开展长江沿岸生态修复等工作。

当前 UGS 规划的研究仍与城市发展的实际需求之间存在一定的脱节,整体上滞后于城市居民生活需求和国土空间规划的需求^[28]。有数据指出,居民平均收入每增加 10%,对 UGS 面积的需求就会增加 1%^[29]。UGS 作为协调生态环境与区域发展的重要工具,以及落实国土空间规划中自然保护和生态

修复等相关规划策略的重要空间载体^[30],对城市规划者、决策者和相关研究者提出了更高的要求,需要重新审视和重视 UGS 的保护与规划。

结合本研究对近 30 a 南京市 UGS 演变特征的分析,提出以下建议:(1)加强生态廊道建设,规划者应在未来国土空间规划中重视 UGS 的连通性和集聚性^[31],坚持“生态优先”原则,充分利用现有的基础设施和自然资源,统筹建设城市绿带、绿网;(2)加强对于永久基本农田的监管和保护。1990—2020 年,南京市 UGS 中的耕地景观退化严重,严格控制生态保护红线区域^[32],降低农用地的侵占迫在眉睫;(3)注重在中心城区等土地紧缺地区“见缝插绿”增加绿地斑块,如适当增加公园绿地、完善道路绿地,或建设垂直绿化和屋顶花园^[33]。

本研究的局限性在于遥感影像分辨率的限制,导致识别 UGS 的精度有限,最终结果可能存在一定不确定性。同时,本研究并未深入剖析 UGS 演变的驱动因素。未来研究应进一步基于更高精度的提取结果,并定量探讨其演变的驱动因素,以期对 UGS 的系统规划与优化提供更为具体全面的建议,实现 UGS 建设与自然山水环境的和谐共生。

5 结论

通过对南京市 UGS 的提取结果进行综合分析,在统计分析、景观生态学方法的指导下,对 1990—2020 年南京市 UGS 时空演变特征进行了定量分析。主要结论如下:

(1)南京市 UGS 总体上呈现减少的趋势,逐渐被非绿色空间挤占,且在空间分布上趋向于破碎化,特别是在中心城区、沿江地区和近郊区等地区。在 30 a 间,UGS 的减少过程呈现出明显的阶段性特征,1990—2005 年剧烈减少,2005—2020 年有所缓和。

(2)南京市 UGS 的景观指数发生了显著变化,表现为景观破碎化程度在不断加剧,景观优势度不断下降,反映了人类活动对 UGS 的频繁干扰,但在 2010 年之后有所改善。景观异质性和多样性在增加,斑块边缘趋于复杂,形状愈发不规则,景观连通性和聚集性降低。

(3)从南京市 UGS 景观指数的空间分布来讲,斑块密度和景观形状指数高值区域由中心城区向南部近郊区、长江以北及沿江地区扩展蔓延;最大斑块指数值则相反;聚合度指数在中心城区和近郊

区表现为低值,景观连通性和集聚性有待加强,在远郊地区则为高值。这些景观特征的变化都与人类活动密不可分。

总体而言,南京市 UGS 在过去 30 a 间经历了显著的时空演变过程,这些变化不仅反映了城市化进程中土地利用的转变,也揭示了人类活动对城市生态系统的深远影响。未来,城市规划和管理应当更加重视 UGS 的保护与优化,以实现城市的可持续发展。

参考文献:

- [1] 李莹莹.城镇绿色空间时空演变及其生态环境效应研究——以上海为例[D].上海:复旦大学,2013.
- [2] 陈爽,张皓.国外现代城市规划理论中的绿色思考[J].规划师,2003,19(4):71-74.
- [3] 王保忠,安树青,宋福强,等.美国绿色空间理论、实践及启示[J].人文地理,2005(5):38-42.
- [4] 李方正,解爽,李雄.基于多源数据分析的北京市中心城绿色空间时空演变研究(1992—2016)[J].风景园林,2018,25(8):46-51.
- [5] 王骊鹂,赵春雷,陈霞,等.基于遥感的唐山市绿色空间演化及对热岛效应的影响[J].自然资源遥感,2022,34(2):168-175.
- [6] 李莹莹,黄成林,张玉.快速城市化背景下上海绿色空间景观格局梯度及其多样性时空动态特征分析[J].生态环境学报,2016,25(7):1115-1124.
- [7] 赵海霞,王淑芬,孟菲,等.绿色空间格局变化及其驱动机理——以南京都市区为例[J].生态学报,2020,40(21):7861-7872.
- [8] 罗琳,谢红彬,关钊,等.矿业城市绿色空间格局演变及其生态系统服务变化研究——以徐州市为例[J].长江流域资源与环境,2023,32(8):1686-1697.
- [9] 姚侠妹,陈媛媛,偶春,等.城市绿色空间时空演变及其生态效益研究——以合肥市区为例[J].长江流域资源与环境,2023,32(1):51-61.
- [10] 谢念斯.城市绿地空间格局的动态变化及其驱动力研究[D].武汉:武汉大学,2019.
- [11] 陈康林,龚建周,刘彦随,等.近 35 a 来广州城市绿色空间及破碎化时空分异[J].自然资源学报,2016,31(7):1100-1113.
- [12] 支林蛟,王锦,刘敏,等.滇中城市群绿色空间格局动态变化多尺度研究[J].西南林业大学学报(自然科学),2021,41(5):88-97.
- [13] LI Y Y, REN B T, CHEN Y S, et al. Multiscale spatiotemporal dynamics analysis of urban green space: Implications for green space planning in the rapid urbanizing Hefei City, China[J].Frontiers in Ecology and Evolution,2022,10:998111.
- [14] 冯一凡,冯君明,李翹.生态韧性视角下绿色空间时空演变及优化研究进展[J].生态学报,2023,43(14):5648-5661.
- [15] PHAN T, KUCH V, LEHNERT L W. Land cover classification u-

- sing Google Earth Engine and random forest classifier—The role of image composition[J]. Remote Sensing, 2020, 12(15):2411.
- [16] HUANG C, YANG J, JIANG P. Assessing impacts of urban form on landscape structure of urban green spaces in China using Landsat images based on Google Earth Engine [J]. Remote Sensing, 2018, 10(10):1569.
- [17] 陶 宇,李 锋,王如松,等.城市绿色空间格局的定量化方法研究进展[J].生态学报, 2013, 33(8):2330-2342.
- [18] 邵大伟,吴殿鸣.基于景观指数的南京主城区绿色空间演变特征研究[J].中国园林, 2016, 32(2):103-107.
- [19] 李启珍,胡希军,韦宝婧,等.长沙市绿色空间与城市扩张耦合关系研究[J].经济地理, 2022, 42(11):87-94.
- [20] WU S Z, WANG D Y, YAN Z R, et al. Spatiotemporal dynamics of urban green space in Changchun: Changes, transformations, landscape patterns, and drivers [J]. Ecological Indicators, 2023, 147(3):109958.
- [21] BREIMAN L. Random forests [J]. Machine Learning, 2001, 45: 5-32.
- [22] 邬建国.景观生态学——格局、过程、尺度与等级[M].北京:高等教育出版社, 2000:34-38.
- [23] HUANG C H, YANG J, LU H, et al. Green spaces as an indicator of urban health: Evaluating its changes in 28 Mega-Cities[J]. Remote Sensing, 2017, 9(12):1266.
- [24] 许 浩,李 蔚,刘 伟,等.南京市域绿地格局时空演变特征及其影响因素[J].浙江农林大学学报, 2023, 40(2):407-416.
- [25] 杨振山,张 慧,丁 悦,等.城市绿色空间研究内容与展望[J].地理科学进展, 2015, 34(1):18-29.
- [26] YUAN Y Y, TANG S Q, GUO W, et al. Spatio-temporal dynamics and driving factors of green-blue space in High-Density Cities: Evidence from central Nanjing[J]. Ecological Indicators, 2024, 160:111860.
- [27] WANG J, ZHANG Y Z, ZHANG X, et al. The spatio-temporal trends of urban green space and its interactions with urban growth: Evidence from the Yangtze River Delta region, China[J]. Land Use Policy, 2023, 128(2):106598.
- [28] 成超男,胡 杨,赵 鸣.城市绿色空间格局时空演变及其生态系统服务评价的研究进展与展望[J].地理科学进展, 2020, 39(10):1770-1782.
- [29] CHOUMERT J. An empirical investigation of public choices for green spaces[J]. Land Use Policy, 2010, 27(4):1123-1131.
- [30] 冯一凡,冯君明,李 翹.生态韧性视角下绿色空间时空演变及优化研究进展[J].生态学报, 2023, 43(14):5648-5661.
- [31] 赵海霞,范金鼎,骆新燎,等.绿色基础设施格局变化及其驱动因素——以南京市为例[J].生态学报, 2022, 42(18):7597-7611.
- [32] 何楠琴,许 浩,刘 伟.大城市郊区绿色空间格局演变及驱动力研究——以南京市江宁区为例[J].西北林学院学报, 2023, 38(5):235-242.
- [33] 王一鸣,尹海伟,孔繁花,等.顾及屋顶绿化的城市三维生态网络构建——以南京市中心城区为例[J].生态学报, 2023, 43(22):9121-9132.

(上接第 47 页)

- [28] 高志晖,魏建和,熊换英,等.几种提取白木香茎干总 RNA 方法的比较[J].生物技术通讯, 2012, 23(5):718-721.
- [29] 邵 敏,周鹤峰,唐历波,等.沉香随机扩增多态性 DNA 反应体系的建立[J].时珍国医国药, 2009, 20(1):74-76.
- [30] 刘军民,张桂芳,徐鸿华,等.白木香不同种质类型的 RAPD 分析[C]//中药资源生态专业委员会.全国第二届中药资源生态学学术研讨会论文集, 2006.
- [31] 吕菲菲,刘培卫,纪宏亮,等.利用 RAPD 分子标记快速鉴定 3 个奇楠种质[J].生物资源, 2021, 43(4):388-394.
- [32] 晏小霞,王祝年,王建荣,等.白木香种质资源遗传多样性的 AFLP 分析[C]//中国植物学会药用植物及植物药专业委员会,中国科学院昆明植物研究所.第十届全国药用植物及植物药学术研讨会论文摘要集, 2011.
- [33] 杨春勇,李海涛,李学兰,等.栽培沉香遗传多样性的 ISSR 和 AFLP 分析比较[J].植物遗传资源学报, 2013, 14(3):553-559.
- [34] 贾文杰,李恩香,杨柏云,等.白木香遗传多样性研究[J].热带亚热带植物学报, 2010, 18(2):159-164.
- [35] 张玉秀,杨 云,吕菲菲,等.基于 ISSR 技术的白木香奇楠种质遗传多样性分析[J].分子植物育种, 2021, 19(15):5204-5212.
- [36] 牛宪立,姬可平,吕国庆.白木香 rDNA ITS 序列测序鉴定的初步研究[J].广东农业科学, 2010, 37(2):167-169.
- [37] 邹枚伶,夏志强,吉家敏,等.白木香 SRAP-PCR 反应体系的建立[J].基因组学与应用生物学, 2009, 28(1):137-140.
- [38] 李伟楠.黑松、赤松无性系遗传多样性分析[D].泰安:山东农业大学, 2021.
- [39] 赵 冬,李 明.白木香种子贮藏过程的生理生化指标变化[J].湖北农业科学, 2013, 52(22):5556-5560.