引文格式：李静, 雷少华. 长时序 RSEI 响应生态宜居城市建设[J]. 地理空间信息, 2023, 21(8): 37-40. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2023.08.009

长时序RSEI响应生态宜居城市建设

李　静[1]，雷少华[2]
（1. 南京市国土资源信息中心，江苏 南京 210005；
2. 南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室，江苏 南京 210029）

摘　要：生态宜居是城市可持续发展的核心驱动力，但因缺乏有效的评价方法，定量监测面临挑战。因此，借助可快速提取城市生态信息的遥感技术，利用 Landsat 5和Landsat 8卫星数据（空间分辨率=30 m），通过重建遥感生态指数（RSEI），对南京市1987—2021年的生态环境质量进行长时序、动态监测。结果表明南京市RSEI在1987—2001年波动下降，2002—2008年振荡持平，并在2009—2021年滚动回升。进一步结合南京市城市建设开发进程讨论发现，RSEI指数随城区用地整体呈现“先下降、后上升”的趋势。1987—2001年，城区大规模扩展导致RSEI逐步降低，而后受到河流地形限制，加之城市建设对生态环境的日益重视，使得2002—2008年间RSEI振荡持平。2007年以来生态环境监察、第七次全国环境保护大会文件汇编、环境影响评价技术导则　生态影响、生态环境质量评价技术规范等十多个生态环境保护文件出台，确立了城市发展的生态保护红线格局，而后2009—2021年RSEI滚动上升。这表明长时序RSEI较好地响应了城市建设与发展的政策思路，为定量评价城市生态宜居性提供了新的方法路径，能助力城市可持续发展。

关键词：生态环境质量；遥感生态指数；生态宜居；可持续发展；南京市
中图分类号：P208　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2023）08-0037-04

Long-term RSEI Responds to the Construction of Ecological and Livable Cities

LI Jing[1], LEI Shaohua[2]
(1. Nanjing Planning and Natural Resources Bureau, Nanjing 210005, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: Ecological livability is the core driving force of urban sustainable development, but quantitative monitoring is facing challenges due to the lack of effective evaluation methods. With the help of remote sensing technology that can quickly extract urban ecological information, we used Landsat5 and Landsat8 satellite data (spatial resolution is 30 m) and reconstructed the remote sensing ecological index (RSEI) to conduct long-term and dynamic monitoring of Nanjing's ecological environment quality from 1987 to 2021. The results show that Nanjing RSEI fluctuated and declined from 1987 to 2001, remaining flat from 2002 to 2008, and rose from2009 to 2021. Further combining with the discussion on the urban construction and development process of Nanjing, it is found that the RSEI index shows a trend of "first falling, then rising" with the overall urban land-use. From 1987 to 2001, the large-scale expansion of the urban area led to the gradual reduction of RSEI, which was then limited by the river topography. In addition, urban construction paid more attention to the ecological environment, so that the RSEI oscillation remained flat from 2002 to 2008. With the introduction of more than ten ecological environment protection documents, such as ecological environment monitoring since 2007, document compilation of the *Seventh National Environmental Protection Conference*, technical guidelines for environmental impact assessment, ecological impact, and technical specifications for ecological environment quality assessment, the ecological red line of urban development has been established, and the RSEI has risen in a rolling manner from2009 to 2021. Itshows that the long-term RSEI responds to the policy ideas of urban construction and development, which is conducive to a new method for quantitative evaluation of urban ecological livability and urban sustainable development.

Key words: ecological environment quality, RSEI, ecological livability, sustainable development, Nanjing City

生态宜居是城市发展必不可少的要素，具体表现为良好的生态环境质量是城市人类生存和社会经济可持续发展的基础[1]，为城市高质量发展提供保障[2]。然而，城市发展与生态环境之间的关系复杂，一方面城市化的快速推进会加剧生态环境退化风险；另一方面生态环境质量的空间不均一性也会制约城市发展。因此，城市生态环境质量的评估监测是《住房和城乡建设部关于开展城市体检试点工作的意见》(建科

收稿日期：2023-01-08；修回日期：2023-02-16。
第一作者简介：李静（1981—），研究生，高级工程师，主要研究方向为智慧城市、规划资源信息化、数据库建设，E-mail：1120999802@qq.com。

函[2019]78号)的八项基本内容之一，对摸清生态环境质量的时空分布及其发展变化，掌握生态环境质量的历史发展脉络，厘清生态环境质量与各个生态要素之间的关系，进而精准把握城市可持续健康发展状况，实现精细化的城市规划和管理具有十分重要的意义[3]。

由于评价方法（指标）单一，城市生态环境质量的综合评估仍然面临挑战[4-9]。

鉴于此，本研究以城市化程度高、数据积累较好的南京市为例，集成绿度、湿度、干度和热度4个环境参数，从遥感生态指数和年生态环境质量优良率等方面切入，对南京市过去34 a（1987—2021）的生态环境质量进行长时序动态分析，分析结果可望为南京市可持续发展的城市规划政策提供重要的建议。

1 材料与方法

1.1 研究区范围与概况

南京市（118°22′~119°14′E，31°14′~32°37′N）呈“南北长、东西窄”分布，南北长约150 km，东西宽30~70 km，全市总面积6 587.02 km^2。南京市属宁镇扬丘陵地区，地势起伏，最大相对高差近450 m，地貌类型多样，多低山、丘陵、岗地和平原洲地。其中平原、洼地及河流湖泊占土地总面积的39.2%。

南京市四季分明，夏季雨热同期，冬季低温少雨。1987—2021年多年平均降雨量约为1 040 mm，多年平均气温15.5℃，多年平均风速3.6 m/s。植被生长期为6—10月。

1.2 数据与方法

通过对1987—2021年186景植被生长期的遥感图像进行定量反演，得到当年的植被指标、热度指标、湿度指标和干度指标，再利用主成分分析分析这4个指标，得到的第一主成分经过计算后，即为遥感生态指数。

1.2.1 绿度指标

基于归一化植被指数（NDVI），可研究城市等区域的植被生长状态，也被用来表示城市植被分布密度、植被覆盖度与植被长势等重要信息。NDVI由近红外波段NIR与红波段Red的地表反射率 SR 计算而来，公式如下：

$$\mathrm{NDVI}=\frac{SR_{\mathrm{NIR}}-SR_{\mathrm{Red}}}{SR_{\mathrm{NIR}}+SR_{\mathrm{Red}}} \tag{1}$$

1.2.2 湿度指标

一般气候越湿润，水资源越丰富，地表湿度越大；气候越干燥，水资源越贫乏，地表湿度越小。地表湿度可以反映土壤等下垫面的湿度状态，进一步通过水热交换等方式影响城市区域小气候。一般利用多光谱遥感数据光谱维的线性变换、空间旋转等方法，利用穗帽变换，将植被生长状况、土壤等信息相互垂直地表征在多维空间上，第三个分量即为地表湿度指数。对于Landsat 5 TM而言，湿度指数（$WI-TM$）表示为：

$$\begin{aligned}WI-TM=&0.031\,5SR_{\mathrm{Blue}}+0.202\,1SR_{\mathrm{Green}}+\\&0.310\,2SR_{\mathrm{Red}}+0.159\,4SR_{\mathrm{NIR}}-\\&0.680\,6SR_{\mathrm{SWIR1}}-0.610\,9SR_{\mathrm{SWIR2}}\end{aligned} \tag{2}$$

对于Landsat 8 OLI，湿度指数（$WI-\mathrm{OLI}$）表示为：

$$\begin{aligned}WI-\mathrm{OLI}=&0.151\,1SR_{\mathrm{Blue}}+0.197\,3SR_{\mathrm{Green}}+\\&0.328\,3SR_{\mathrm{Red}}+0.340\,71SR_{\mathrm{NIR}}-\\&0.711\,7SR_{\mathrm{SWIR1}}-0.455\,9SR_{\mathrm{SWIR2}}\end{aligned} \tag{3}$$

1.2.3 干度指标

干度指数（NDBSI）表示地表的干燥程度，与不透水层和裸露地表的部分有关，主要体现在蓝光（BLUE）、绿光（GREEN）、红光、近红外、中红外1（SWIR1）等波段。分别通过公式（4）和（5）得到建筑指数（IBI）和裸土指数（SI）。经过平均得到NDBSI。该指数数值越大越干燥，数值范围为介于-1到1之间。

$$SI=\frac{\left(SR_{\mathrm{SWIR1}}+SR_{\mathrm{Red}}\right)-\left(SR_{\mathrm{Blue}}+SR_{\mathrm{NIR}}\right)}{\left(SR_{\mathrm{SWIR1}}+SR_{\mathrm{Red}}\right)+\left(SR_{\mathrm{Blue}}+SR_{\mathrm{NIR}}\right)} \tag{4}$$

$$\mathrm{IBI}=\frac{2SR_{\mathrm{SWIR1}}/(SR_{\mathrm{SWIR1}}+SR_{\mathrm{NIR}})-[\frac{SR_{\mathrm{NIR}}}{SR_{\mathrm{NIR}}+SR_{\mathrm{Red}}}+\frac{SR_{\mathrm{Green}}}{SR_{\mathrm{Green}}+SR_{\mathrm{SWIR1}}})}{2SR_{\mathrm{SWIR1}}/(SR_{\mathrm{SWIR1}}+SR_{\mathrm{NIR}})+[\frac{SR_{\mathrm{NIR}}}{SR_{\mathrm{NIR}}+SR_{\mathrm{Red}}}+\frac{SR_{\mathrm{Green}}}{SR_{\mathrm{Green}}+SR_{\mathrm{SWIR1}}})} \tag{5}$$

$$\mathrm{NDBSI}=\frac{SI+IBI}{2} \tag{6}$$

1.2.4 热度指标

城市地表各区域温度的微小差异可引起热红外辐射的明显变化，主要体现在8~14 μm的热红外波段。本文采用基于影像的算法反演地表温度，具体计算公式如下。首先进行辐射定标：

$$B(\mathrm{LST})=a\times DN+b \tag{7}$$

式中，$B(\mathrm{LST})$为Landsat 5 TM的band 6与Landsat 8 OLI的band 10的辐射值；DN为影像的像素灰度值；a和b分别为该波段的增益系数与偏置系数，查找影像头文件即可获取。根据亮度温度的反演模型将其进一步转换为传感器处的亮温T。

$$T=\frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{B(\mathrm{LST})}+1\right)} \tag{8}$$

式中，K_1和K_2分别为定标参数，针对TM数据，K_1=607.76 W/（m²·sr⁻¹·μm⁻¹），K_2=1 260.56 K，针对OLI数据，K_2=774.89 W/（m²·sr⁻¹·μm⁻¹），K_2=1 321.08 K。在计算得到黑体辐射亮度后，根据地表比辐射率纠正法则，求得地表真实温度LST：

$$\mathrm{LST}=\frac{T}{\left[1+\left(\frac{\lambda T}{\rho}\right)\ln\varepsilon\right]} \tag{9}$$

式中，λ为热红外波段的中心波长，针对TM和OLI分别取值11.5 μm和10.90 μm；ρ为1.438×10^{-2}mk；ε为地表辐射率，其取值与植被覆盖度有关，公式为：

$$\varepsilon_{\mathrm{nature-surface}}=0.962\,5+0.061\,4F-0.046\,1F^2 \tag{10}$$

$$\varepsilon_{\mathrm{building}}=0.958\,9+0.086F-0.067\,1F^2 \tag{11}$$

式中，$\varepsilon_{\mathrm{nature-surface}}$和$\varepsilon_{\mathrm{building}}$分别为非人为扰动地表和城镇扰动地表的比辐射率；$F$为植被覆盖度，参考下式进行计算。

$$F=\left[\frac{\mathrm{NDVI}-\mathrm{NDVI}_{\min}}{\mathrm{NDVI}_{\max}-\mathrm{NDVI}_{\min}}\right]^2\times100\% \tag{12}$$

1.2.5　计算RSEI与R

计算RSEI之前，需要对绿度、湿度、干度、热度四个指标行正规化，利用下式将量纲统一到[0，1]之间。

$$NI_i=\frac{I_i-I_{\min}}{I_{\max}-I_{\min}} \tag{13}$$

PCA方法的输入数据即将量纲统一后的4个指标，第一主成分即为RSEI的初始值$\mathrm{RSEI}_{\mathrm{r}}$：

$$\mathrm{RSEI}_{\mathrm{r}}=\mathrm{PCA}_1(\mathrm{NDVI},WI,\mathrm{LST},\mathrm{NDBSI}) \tag{14}$$

一般情况下认为数值越大生态越优，因此为使PCA_1大的数值代表好的生态环境质量，再利用下式处理，获得初始的生态指数RSEI_0。

$$\mathrm{RSEI}_0=1-\mathrm{RSEI}_{\mathrm{r}} \tag{15}$$

同样利用正规化方法对RSEI_0进行处理，处理后的数据便于逐年生态环境的纵向比较和区域间生态环境质量的横向比较。RSEI即为遥感生态指数，其值介于[0，1]之间。

$$\mathrm{RSEI}=\frac{\mathrm{RSEI}_0-\mathrm{RSEI}_{\min}}{\mathrm{RSEI}_{\max}-\mathrm{RSEI}_{\min}} \tag{16}$$

基于南京市逐年6—10月生长季内所有可用影像，经过去云、去水体等处理后求取逐波段的平均值，利用以上方法计算出逐年的RSEI值，RSEI值越接近1，生态越好。当ESRI大于0.6时，生态环境质量为优良。将年RSEI大于0.6的面积除以该区域非水陆地总面积，得到区域年生态环境质量优良率R值，单位为%。

2　结果与讨论

根据遥感反演结果（图1），南京市年RSEI值介于0.59~0.76之间，中值为0.71，平均值为0.70，标准差为0.04，郊区整体高于城区，生态质量整体较好。时间上，年RSEI最大值出现在1990年，最小值出现在2009年。此外，南京市多年生态环境质量优良率R平均值为79.75%，最大值出现在1987年，为90.53%，最小值出现在2011年，为52.00%。这与南京市整体城市发展历程基本契合。

南京市11个区，年RSEI由大到小依次排序为溧水、江宁、浦口、玄武、六合、高淳、雨花台、栖霞、建邺、秦淮和鼓楼，其平均值分别为0.73、0.72、0.72、0.71、0.71、0.70、0.66、0.64、0.62、0.59、0.56。最小值多出现在2009—2011年，最大值多出现在1987—1990年。各区年R值排序依次为溧水87.74%、浦口84.46%、江宁84.20%、六合84.08%、高淳78.23%、玄武75.11%、雨花台70.28%、栖霞69.34%、建邺61.08%、秦淮46.38%、鼓楼34.44%。其中，浦口、栖霞、玄武、建邺、秦淮、雨花台、江宁、高淳均在1987年R值最大，在2009—2011年R值最小。

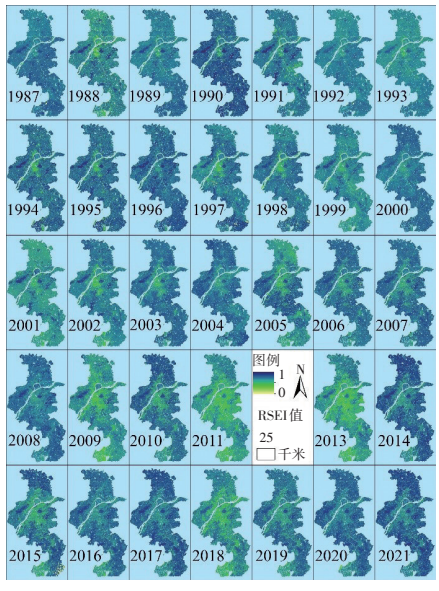


图1　南京市1987—2021年RSEI时空分布图

南京市在研究时段内建成区大幅扩展，城市建设在分布上较明显的受到河流、地形的限制，现有建成区主要集中在主城区东南以及主长江两侧，该区域RSEI和R值都是先减小后增大，说明绿色南京建设深入发展，不仅向预留生态用地纵深发展，城市建成区内的生态环境质量也稳步提升，重要生态功能保护区保护得到进一步加强。随着一批湿地公园、森林公园、绿地公

园和城市风光带、滨江风光带的建设，尤其近年来青奥会、下关滨江公园带、建邺滨江公园建设基本完成，使得南京滨江RSEI值在近十年来不断有增加的趋势。

2007年以来南京市出台了系列生态环境保护文件，确立了生态环境质量优先考虑的发展总基调，在水质、土壤恢复、大气保护、生物多样性维护等全面实施了十大行动计划。一方面，南京市生态保护红线格局与自然保护地、双评价生态保护极重要区等措施的实施，保证了生态系统完整性和生态廊道连通性；另一方面，节能减排、环境质量、生态建设等方面指标作为建设“经济强、百姓富、环境美、社会文明程度高”新南京的核心指标，南京市带头作为，持续加大生态环境建设力度，不断改善城市人居生态环境。

南京市境内开采矿山较多，开采后废弃矿山的生态环境较难修复。通过对已关停采石、采砂和砖瓦用粘土矿山进行综合整治，恢复和重建矿山生态环境，使得矿山山区RSEI、R数值增高，生态环境质量转好。

3 主要结论

本研究以南京市为例，通过绿度、湿度、干度、热度4个指标建立1987—2021年逐年的城市遥感生态指数RSEI和区域年生态环境质量优良率R，并分区对南京市及其下辖各区的生态环境质量的动态变化进行评估。南京市RSEI和区域R值均随着南京市的开发进程呈现先降后升的趋势。RSEI值大概经历了3个阶段，分别是1987—2001的被动下降期；2002—2008年的动荡期；2009—2021年的滚动回升期。与之相似，R值也是先下降，后升高，拐点则出现在2009年。从2009年开始，南京市生态环境质量逐步向好。

4 政策建议

1）城市建成区内生态廊道建设。南京市1987年以来快速的城市化进程加剧了城市的热岛效应，引起了生境破碎，RSEI值明显下降，对动植物多样性产生了巨大的影响，导致1987—2001年南京市R值的被动下降。生态廊道作为城市中的绿色线性连续空间，不仅可以有效防止城市高温区集中连片，也可以充分利用和保护自生植物，使其发挥应有的生态功能，增加植被盖度，改善区域生态环境质量。

2）持续加大城市郊区矿山修复力度。矿山生态修复是长江流域“山水林田湖草”一体化治理的重要组成部分，也是南京市作为长江经济带生态环境问题的重点攻关方向，可有效降低地表干度，增加植被盖度，是2009—2021年南京市RSEI与R值的滚动回升的主要原因。因此，更要建立包括规划编制、源头防控、污染治理、生态恢复等的一系列管控措施，健全法律法规及监管机制、完善矿山修复规范和标准、坚持“以废治废”的生态修复思路，积极引导社会地方政府和矿区等生产建设企业对生态环境引起足够的重视，加大经费投入，维护好生态修复区生态环境质量。

3）城市湿地保护与建设。湿地被誉为“地球之肾”，适应的湿地分布可有效增加区域地表湿度，具有涵养水源、调节气候和维护生物多样性等多重生态功能，可有效维持周边区域较高的RSEI与R值。应因地制宜地采取自然恢复、人工促进自然恢复和人工恢复等模式，并以自然恢复为主，通过湿地自身动态变化过程而进行。在自然恢复进程缓慢区域，通过人工撒播、补种水生植协等方式辅助自然恢复。

参考文献

[1] 张文忠,何炬,谌丽. 面向高质量发展的中国城市体检方法体系探讨[J]. 地理科学,2021,41(1):1-12

[2] 朱嘉伟,谢晓彤,李心慧. 生态环境承载力评价研究: 以河南省为例[J]. 生态学报,2017,37(21):7 039-7 047

[3] 石晓冬,杨明,王吉力. 城市体检: 空间治理机制、方法、技术的新响应[J]. 地理科学,2021,41(10):1 697-1 705

[4] 李昊,徐辉,翟健,等. 面向高品质城市人居环境建设的城市体检探索: 以海口城市体检为例[J]. 城市发展研究,2021,28(5):70-76

[5] 李军,桑潇,张成业,等. 资源型城市长时间序列土壤含水量变化分析: 以锡林浩特市为例[J]. 测绘通报,2021(7):17-22

[6] 胡洁,姜成桢,杨勇,等. 黑河中下游植被覆盖度变化遥感监测[J]. 测绘通报,2021(10):34-38

[7] 王驷鹞,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

[8] 张鹏岩,白家玮,荣天琪,等. 黄河下游影响区城镇化:生态和谐机制与耦合协调发展分析[J]. 测绘通报,2021(10):15-19

[9] 雷少华,陈芬,马金戈,等. 基于DEM分割小流域的水热效应评估: 以福建省长汀县为例[J]. 亚热带资源与环境学报,2016,11(2):48-56

[10] 徐涵秋. 城市遥感生态指数的创建及其应用[J]. 生态学报,2013,33(24):7 853-7 862

[11] 李婧,郝育红,孙京敏,等. 基于遥感生态指数的城市矿山生态环境时空变化评价[J]. 城市发展研究,2021,28(1):17-22

[12] 汪东川,陈星,孙志超,等. 格尔木长时间序列遥感生态指数变化监测[J]. 生态学报,2022,42(14):1-12

[13] 张浩,杜培军,罗洁琼,等. 基于遥感生态指数的南京市生态变化分析[J]. 地理空间信息,2017,15(2):58-62