

DOI: 10.20103/j.stxb.202208212398

曹书舸, 陈爽. 江苏重要生态功能区质量演变及红线管控效应. 生态学报, 2023, 43(21): 8933-8947.

Cao S G, Chen S. Analysis of quality evolution of important ecological function areas and implementation effects of the ecological redline in Jiangsu Province, China. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(21): 8933-8947.

江苏重要生态功能区质量演变及红线管控效应

曹书舸^{1,2}, 陈爽^{1,2,*}

1 南京信息工程大学地理科学学院, 南京 210044

2 南京信息工程大学“一带一路”城市可持续发展研究院, 南京 210044

摘要: 生态保护红线区作为重要生态功能区, 对国家生态安全起到了基础保障作用。如何准确有效地评估生态保护红线区生态质量演变以及生态保护红线的作用, 对“红线”政策的进一步完善和区域可持续发展具有重要意义。基于 Google Earth Engine 平台, 利用 Landsat 5、8 长时序遥感影像构建出江苏全域 1985—2021 年遥感生态指数 RSEI, 分析了生态保护红线区 1985 年以来的生态质量演变情况, 评估了 2013 年以来实施的生态保护红线政策在生态保护方面的效用。结果表明: (1) 针对江苏全域构建的 RSEI 模型 PC1 平均贡献率高于 70%, 适用于江苏全域及生态保护红线区的生态质量演变分析。1985—2021 年 RSEI 提升的面积占江苏总面积的 58.2%, 红线区平均 RSEI 值在 0.52—0.63 间变化, 整体呈现波动上升的趋势; (2) 江苏生态保护红线区整体 RSEI 均值突变年份在 2003 年, 各市红线区 RSEI 均值突变年份大多集中在 1995—2005 年间, 1990 年代苏南和苏中部分城市出现由好向差的突变, 2000 年代苏北城市出现由差向好的突变; (3) 生态保护红线具有屏蔽效应, 有效阻挡了建筑用地等不透水面和裸土向保护区侵蚀, 红线区内 RSEI 增长趋势显著高于红线区外部。生态保护红线在具有较强经济实力的城市管控效应更加突出, 13 地市中南通、苏州、无锡、常州、镇江为生态质量明显提升城市, 南京、徐州和泰州为加速提升城市, 连云港和淮安为缓速提升城市, “红线”政策在宿迁、扬州和盐城的生态质量提升作用不明显。该方法改进后可用于生态保护红线监测与管控效应的业务化评估。

关键词: 生态保护红线; 遥感生态指数; Google Earth Engine; 突变检验; 管控效应

Analysis of quality evolution of important ecological function areas and implementation effects of the ecological redline in Jiangsu Province, China

CAO Shuge^{1,2}, CHEN Shuang^{1,2,*}

1 School of Geographical Sciences, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China

2 Research Centre of Urban Sustainable Development, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China

Abstract: Ecological redline zone, as an important ecological function area, plays a fundamental role in guaranteeing the national ecological security. How to accurately and effectively assess the ecological quality evolution of ecological redline zone and the implementation effects is of great significance to further improvement of the “red line” policy and regional sustainable development. Based on the Google Earth Engine platform, Landsat 5 and 8 long-time sequence remote sensing images were used to establish a Remote Sensing Ecological Index (RSEI) for Jiangsu Province from 1985 to 2021, with which the quality change from 1985 in the ecological redline zone was analyzed and the role of ecological redline policy implemented since 2013 was assessed. The results showed that: (1) the average contribution rate of the RSEI model PC1 established for Jiangsu Province is higher than 70%, which applies to the analysis of the evolution of ecological quality in

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFE0105900); 国家自然科学基金项目(42161144003, 41771140); 南京信息工程大学人才启动基金

收稿日期: 2022-08-21; **网络出版日期:** 2023-06-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: schens@nuist.edu.cn

Jiangsu Province and the ecological redline zone. From 1985 to 2021, 58.2% of the total area of Jiangsu was improved in terms of RSEI, and the average RSEI value of the ecological redline zones varied between 0.52 and 0.63, showing an overall fluctuating upward trend. (2) The year of the sudden change in the mean value of RSEI in the ecological redline zones as a whole was 2003, and the sudden change in the mean value of RSEI in ecological redline zones in each city was mostly concentrated between 1995 and 2005, with some cities in southern Jiangsu and central Jiangsu showing a sudden change from good to poor in the 1990s, and cities in northern Jiangsu showing a sudden change from poor to good in the 2000s. (3) The ecological redline presented a shielding effect in blocking the encroachment of impervious surfaces and bare soil, such as building land, into the protected area, with a significantly higher trend of RSEI growth within the ecological redline zone than outside. Among the 13 cities, Nantong, Suzhou, Wuxi, Changzhou, and Zhenjiang were the cities with significant improvement, Nanjing, Xuzhou, and Taizhou were the cities with accelerated improvement, Lianyungang and Huai'an were the cities with slow improvement, Suqian, Yangzhou and Yancheng were the cities with insignificant improvement of RSEI, the "red line" policy has no obvious effect on improving the ecological quality of the ecological redline zones in these three cities. This method can be used for the operational monitoring and assessment of the implementation effects of ecological redline policy.

Key Words: eco-redline; remote sensing ecological index; Google Earth Engine; mutation test; controlling effect

区域生态质量关系着人类生存和区域经济发展,近几十年来城市快速扩张使得城市不透水面增加、植被等生态用地减少^[1-2],造成生态质量变差,进而影响区域可持续发展^[3]。为遏制区域生态质量的不断恶化,满足人们对绿色健康生活环境的强烈需求,我国在 2000 年前后开始大力倡导生态城市建设、实施生态空间保护政策^[4],如江苏省环保厅于 2004 年正式启动和开展全省重要生态功能保护区区域规划工作。2013 年江苏在全国率先印发《江苏省生态红线区域保护规划》,在重要生态功能保护区区域规划基础上划定了生态保护红线区域,并指导各地市政府进行“红线”的划定和用途管制政策的制定,2017 年按国家统一要求编制了《江苏省国家级生态保护红线规划》。生态保护红线区(以下简称“红线区”)作为一种人为划定、需实施特殊保护的区域,被赋予维护区域生态安全和可持续发展的功能,其生态质量的变化也得到学界与管理者高度重视。大量研究报导了红线区景观^[5-8]、生态系统服务价值^[9-10]的动态变化,也有研究^[11]指出南京市 1988—2017 年间红线区生态质量呈振荡上升趋势。然而,已有研究多是将红线区作为一种特定对象来观测,并没有确切回答这些区域的生态质量上升是否受“红线”政策影响。

由于红线区是在重要生态功能保护区的基础上划定,一定程度上具备了生态系统完整性和连通性特征^[12],呈现为自然或近自然景观类型,因此具有边缘效应,即斑块边缘部分受外部区域影响表现出与中心区域不同的生态学特征^[13]。有学者研究了保护区的边缘效应,如金奇豪等^[14]发现沿海自然保护区边缘地带的人类干扰明显高于内部区域;Hua 等^[15]发现青藏高原保护区边缘在植被生长中起着微弱但重要的作用。同时,生态保护红线又是一种人为划定的国土空间管理边界,可能对空间相互作用产生屏蔽效应和中介效应^[16],使得跨边界同质要素发生量变与质变。因此,基于上述理论假设,本文拟综合利用长时序遥感数据和统计学方法,定量分析红线区的生态质量变化,揭示红线区的边缘效应,并证明“红线”作为政策的管控效应是否确切存在?

区域生态质量评估方法经历了从宏观到微观、单要素到多要素集成评估的过程。早期限于数据可获取性,主要从宏观层面选取相关统计和观测资料开展综合评估,如傅伯杰^[17]评估了中国各省区的生态质量,朱晓华^[18]对江苏生态质量及其驱动机制进行研究。21 世纪以来卫星遥感技术的兴起使得研究更加深入,常用的遥感指标就包括植被参数^[19-20]、土地覆盖相关指数^[21]、不透水面指数^[22]等,并且日益关注区域生态环境多因素指标的共同作用^[23],采用层次分析法^[17]、变异系数法^[24]、TOPSIS^[25]等手段综合多源数据指标构建模型开展生态质量评估。其中,由徐涵秋^[26]于 2013 年提出的遥感生态指数(Remote Sensing Ecological Index,

RSEI)综合了绿度(NDVI)、湿度(Wet)、热度(LST)和干度(NDBSI)4个遥感生态指标,权重设定采用了主成分分析,免去了人为设定的影响。Google Earth Engine(GEE)等遥感云计算平台的快速发展使得遥感数据的长时序分析和处理应用变得更加方便快捷^[27],目前已广泛应用于城市群^[28-30]、湖泊流域^[23,31-33]和生态脆弱区^[34-36]的生态质量变化研究。本文选择江苏为研究区,基于GEE平台对1985年以来江苏全域遥感生态指数进行计算和分析,并回答以下问题:(1)江苏生态保护红线区生态质量的空间分异及演变趋势是什么?(2)2013年以来实施的生态保护红线政策是否发挥了作用?研究成果可为“红线”政策效果评估提供科学方法和数据支撑。

1 研究区概况与数据源

1.1 研究区概况

江苏位于东部沿海,北接山东,西接安徽,南接浙江、上海,地势平坦,平原占总面积的68%。地处我国经济最为发达的长三角地区,人均GDP全国最高,GDP总量排名全国第二。

全省划定的陆域红线区域面积22839.58 km²,占全省陆域国土面积的22.23%^[37]。本文选择33个红线区斑块(图1),其中每个市选择至少两个斑块,建立“红线”外1 km缓冲区进行管控效应分析。为确保建立的缓冲区面积具有一定大小且不会覆盖相邻红线区范围,本文对相邻红线区进行合并。

1.2 数据来源及预处理

本文主要采用的遥感数据为GEE平台提供的Landsat 5(TM)和Landsat 8(OLI)卫星地表反射率产品,空间分辨率30 m。产品数据经过了大气校正,辐射定标和正射校正。

基于GEE平台上的Java Script编程对数据进行去云和水体掩膜。采用CFMASK算法生成的QA质量波段进行云掩膜以达到去云目的。地表水体会对NDVI等指标分量的计算产生影响,进而影响到主成分分析得出的RSEI值,本文采用徐涵秋提出的改进的归一化水体差异指数MNDWI对去云后的影像进行水体掩膜^[38]。为解决江苏夏季多云雾覆盖造成的影像部分缺失问题,本文使用目标年份及前后一年夏季6—9月的影像对空缺部分进行填补与中值合成,获得江苏完整影像的同时对影像序列值起到了一定平滑作用。

2 研究方法

2.1 RSEI计算

遥感生态指数RSEI^[26]包括绿度(NDVI)、湿度(WET)、热度(LST)、干度(NDBSI)四个指标,各指标基于TM和OLI传感器光谱波段数据计算获得(表1),并通过主成分分析耦合四个指标构建RSEI。RSEI值在[0,1]区间内,值越高表示生态质量越高,根据等分原则分为差、较差、中等、良、优共5个等级。

2.2 生态保护红线管控效应评估

通过比较生态保护红线政策实施前后、红线区内外的RSEI变化,采用统计学方法证实“红线”政策的有效性。具体方法及流程如图2所示。

2.2.1 Mann-Kendall 突变检验

Mann-Kendall 突变检验作为非参数检验,不需要样本服从某种分布且不受少数异常值的干扰,具体计算方法见文献^[36]。本文对江苏全域及13市域内红线区RSEI均值序列进行M-K检验,判定突变点和总体变化趋势。设定显著性水平 $\alpha = 0.05$,临界值 $u_{0.05} = \pm 1.96$ 。若结果图中 UF_k 曲线在临界线内变动,表明变化曲线趋势和突变不明显,若超过临界线时表明上升或下降趋势显著; $UF_k > 0$,表明序列呈上升趋势,反之则为下降趋势。如果 UF_k 和 UB_k 在临界线之间出现交点,则交点时刻即为突变开始时间。若交点出现在临界线外或出现多个,则不是有效突变点,需结合Pettitt突变检验来加以判断^[41-42]。

2.2.2 岭回归趋势分析

本文采用GEE平台提供的岭回归函数对RSEI及与地表覆盖状况息息相关的指标分量NDVI和NDBSI

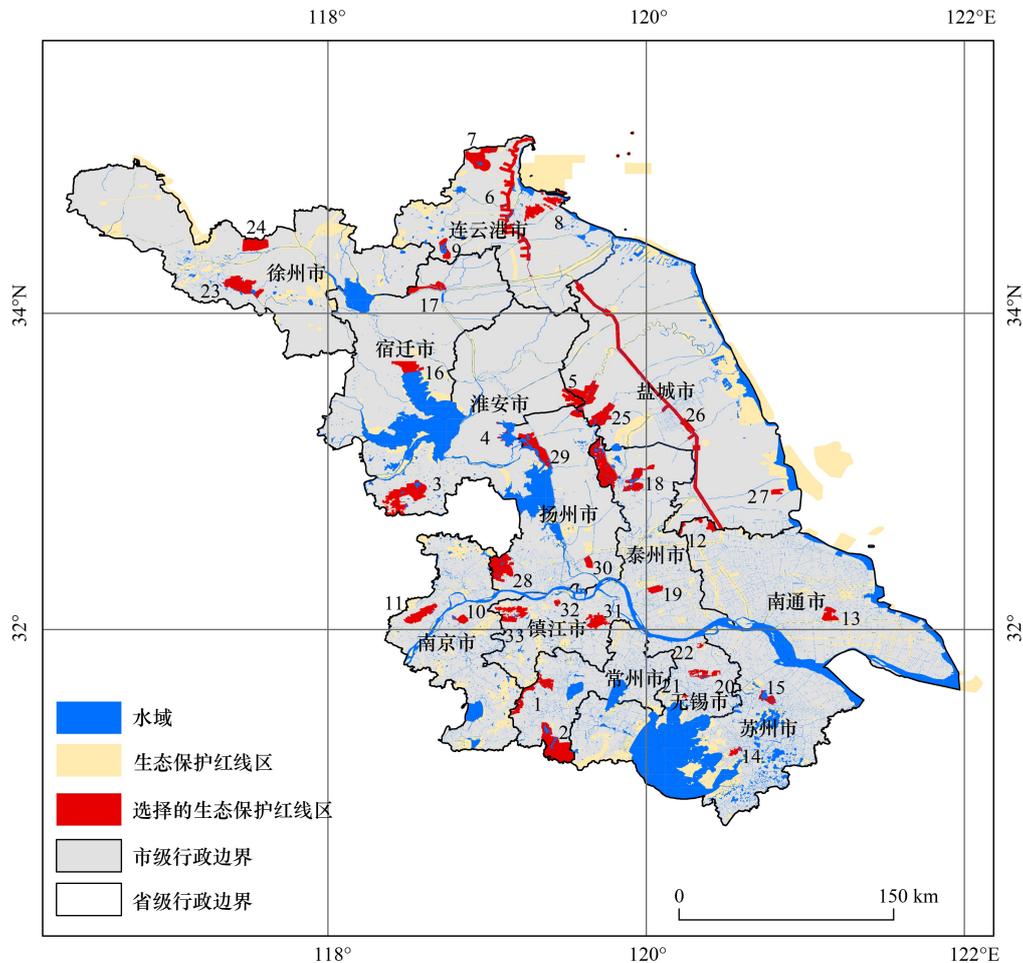


图1 研究区位置

Fig.1 The location of the study area

1.溧阳瓦屋山省级森林公园、向阳水库水源涵养区、方山(金坛市)森林公园;2.溧阳南山水源涵养区、天目湖风景名胜、溧阳天目湖湿地自然保护区;3.龙王山水源涵养区、龙王山水库饮用水水源保护区、盱眙仇集生态公益林、盱眙铁山寺国家森林公园;4.白马湖(洪泽、金湖县、淮安区)重要湿地;5.九龙口(淮安区)重要湿地、阜宁县马家荡重要湿地、夏粮河潮河饮用水水源保护区、建湖县九龙口风景名胜、扬州射阳湖省级湿地公园;6.通榆河(连云港市区、灌云、赣榆县)清水通道维护区;7.塔山小塔山水源保护涵养区;8.连云港云台山风景名胜、9.安峰山水源涵养区;10.钟山风景名胜;11.南京老山森林公园;12.海安县里下河重要湿地;13.东社特殊生态产业区;14.石湖(吴中区)风景名胜、上方山国家森林公园;15.沙家浜—昆承湖重要湿地;16.洪泽湖(宿城区)重要湿地;17.古栗林种子资源保护区;18.兴化市西北湖荡重要湿地;19.泰兴市生态公益林区;20.马镇河流重要湿地;21.惠山国家森林公园;22.定山风景名胜;23.张集地下水饮用水水源保护区、圣人窝森林自然保护区;24.徐州市大洞山森林自然保护区、贾汪区地下水饮用水水源保护区;25.西塘河重要湿地;26.通榆河(东台市响水、阜宁、滨海、建湖县)清水通道维护区;27.东台黄海省级森林公园;28.仪征西部丘陵水源涵养区、枣林湾有机农业产业区、登月湖风景名胜、仪征市红山风景名胜、月塘水库饮用水水源保护区、石柱山奇景园风景名胜、捺山茶园有机农业产业区;29.宝应西自然保护、宝应湖重要湿地;30.江都东郊城市森林公园;31.齐梁文化风景名胜;32.南山风景名胜;33.九华山生态公益林、空青山生态公益林、句容北山水库饮用水水源保护区、句容宝华山自然保护区

进行像元趋势分析。岭回归是一种改良的最小二乘估计法,通过放弃无偏性对回归系数的大小施加限制来缩小其值,结果更为可靠符合实际。本文基于 GEE 平台进行的趋势分析能够快速有效地得出江苏全域逐像元 RSEI 趋势和显著性 P 值,这是传统本地端软件运算所无法实现的。

2.2.3 配对样本 T 检验

基于选择的 33 个红线区斑块在“红线”范围外建立 1 km 缓冲区,将斑块内与外 1 km 缓冲区的两组区域统计值进行配对样本 T 检验,检验是否存在显著性差异。原假设为两组序列均值无显著差异,备择假设为其

具有显著差异。当自由度 $df \geq 30$ 时,结果中 $|t|$ 越大,表明配对样本均值差异越大,若 $|t| > 1.96$ 且 $P < 0.05$,则拒绝原无效假设并接受备择假设,即两组配对样本差异显著。

表 1 RSEI 指标计算方法

Table 1 Calculation methods of indicators

指标 Indicators	计算公式 Calculation formulas
绿度 NDVI	$NDVI = (\rho_{NIR} - \rho_{Red}) / (\rho_{NIR} + \rho_{Red})$
湿度 Wet	$WET_{TM} = 0.0315\rho_{Blue} + 0.2021\rho_{Green} + 0.3102\rho_{Red} + 0.1594\rho_{NIR} - 0.6806\rho_{SWIR1} - 0.6109\rho_{SWIR2}$ $WET_{OLI} = 0.1511\rho_{Blue} + 0.1972\rho_{Green} + 0.3283\rho_{Red} + 0.3407\rho_{NIR} - 0.7117\rho_{SWIR1} - 0.4559\rho_{SWIR2}$
热度 LST	$LST = T_B / [1 + (\lambda T_B) / \rho] \ln \varepsilon - 273.15$ $T_B = K_2 / \ln(K_1 / L_\lambda + 1)$ $L_\lambda = gain \times DN + bias$
干度 NDBSI	$NDBSI = (SI + IBI) / 2$ $SI = [(\rho_{SWIR1} + \rho_{Red}) - (\rho_{Blue} + \rho_{NIR})] / [(\rho_{SWIR1} + \rho_{Red}) + (\rho_{Blue} + \rho_{NIR})]$ $IBI_1 = 2\rho_{SWIR2} / (\rho_{SWIR1} + \rho_{NIR}) - [(\rho_{NIR} / (\rho_{Red} + \rho_{NIR}) + \rho_{Green} / (\rho_{SWIR1} + \rho_{Green}))]$ $IBI_2 = 2\rho_{SWIR2} / (\rho_{SWIR1} + \rho_{NIR}) + [(\rho_{NIR} / (\rho_{Red} + \rho_{NIR}) + \rho_{Green} / (\rho_{SWIR1} + \rho_{Green}))]$ $IBI = IBI_1 / IBI_2$
遥感生态指数 RSEI	$N = (I - I_{min}) / (I_{max} - I_{min})$ $RSEI_0 = 1 - PC1[f(NDVI, Wet, LST, NDBSI)]$ $RSEI = (RSEI_0 - RSEI_{0min}) / (RSEI_{0max} - RSEI_{0min})$

ρ_i : 各对应波段的地表反射率; NDVI: 归一化植被指数 Normalized difference vegetation index; LST: 地表温度 Land surface temperature; λ : 热红外波段波长, Landsat 5、8 取值分别为 11.5 μm 和 10.9 μm ^[39]; $\rho = 0.014387 \text{ m} \cdot \text{k}$; ε : 发射率, 根据计算的 NDVI 阈值处理得到^[40]; T_B : 热辐射强度转化的亮度温度; K_1 、 K_2 : 影像源所获参数; L_λ : 热红外波段辐射强度值(采用 calibratedRadiance 函数由 Landsat 5、8 对应的 B6、B10 波段像元灰度值计算得到 L_λ); DN : 影像像元灰度值 Digital number; gain: 增益系数; bias: 偏置系数; NDBSI: 归一化建筑裸土指数 Normalized difference built-up and soil index; SI: 裸土指数 Soil index; IBI: 建筑指数 Index-based built-up index; N : 四个指标的正向归一化处理^[23]; I : 各指标值; I_{max} 、 I_{min} : 目标年份该指标的最大、最小值; $PC1$: 第一主成分 Principal component 1; f : 正向归一化处理函数; $RSEI_{0max}$ 、 $RSEI_{0min}$: 目标年份的 RSEI 最大、最小值; RSEI: 遥感生态指数 Remote sensing ecological index

3 结果与分析

3.1 RSEI 模型效果

本文针对江苏全域 RSEI 建模结果统计第一主成分(PC1)结果,如表 2 所示。构成 RSEI 的 4 个指标中绿度(NDVI)和湿度(WET)的特征向量均为正值,说明其对 RSEI 起着正效应,而热度(LST)和干度(NDBSI)特征向量为负,说明起着负效应。四个指标的 PC1 上贡献率平均为 71.70%,集中了大部分指标特征信息,使用 PC1 表征 RSEI 是合理的。

本文选择了 3 个红线区进行 RSEI 模型可靠性验证(图 3)。可以看出,红线区及 1 km 缓冲区内的建筑用地等不透水面区域(棕褐色)反演结果为生态质量差,而植被覆盖区域(暗绿色)的生态质量好,这说明 RSEI 模型可以有效表征红线区生态质量水平,并可结合不同时相间 RSEI 定量地刻画生态质量变化程度。

表 2 PC1 上特征向量及贡献率

Table 2 Eigenvector and contribution ratio on PC1

年份 Year	绿度 NDVI	湿度 WET	热度 LST	干度 NDBSI	贡献率/% Contribution	年份 Year	绿度 NDVI	湿度 WET	热度 LST	干度 NDBSI	贡献率/% Contribution
1985	0.52	0.44	-0.35	-0.64	58.09	2003	0.49	0.43	-0.49	-0.58	70.49
1986	0.50	0.42	-0.45	-0.62	64.16	2004	0.49	0.43	-0.48	-0.58	70.36
1987	0.50	0.39	-0.49	-0.60	65.26	2005	0.49	0.47	-0.46	-0.57	72.47
1988	0.47	0.41	-0.51	-0.59	66.52	2006	0.50	0.49	-0.43	-0.57	72.42
1989	0.49	0.43	-0.46	-0.60	66.17	2007	0.51	0.43	-0.47	-0.58	72.38

续表

年份 Year	绿度 NDVI	湿度 WET	热度 LST	干度 NDBSI	贡献率/% Contribution	年份 Year	绿度 NDVI	湿度 WET	热度 LST	干度 NDBSI	贡献率/% Contribution
1990	0.50	0.41	-0.48	-0.59	68.27	2008	0.51	0.43	-0.46	-0.58	70.17
1991	0.49	0.42	-0.47	-0.60	69.44	2009	0.50	0.43	-0.47	-0.59	72.26
1992	0.45	0.37	-0.45	-0.61	64.12	2010	0.49	0.44	-0.44	-0.60	73.67
1993	0.48	0.42	-0.48	-0.60	67.14	2011	0.51	0.45	-0.43	-0.58	71.28
1994	0.46	0.45	-0.49	-0.59	65.85	2013	0.55	0.46	-0.37	-0.59	78.91
1995	0.47	0.41	-0.46	-0.60	67.53	2014	0.55	0.46	-0.39	-0.58	83.46
1996	0.48	0.45	-0.45	-0.60	66.09	2015	0.51	0.42	-0.40	-0.63	85.87
1997	0.48	0.41	-0.44	-0.59	64.23	2016	0.54	0.45	-0.44	-0.56	84.96
1998	0.49	0.46	-0.42	-0.60	64.12	2017	0.55	0.43	-0.44	-0.56	84.00
1999	0.49	0.46	-0.42	-0.60	66.32	2018	0.56	0.45	-0.41	-0.57	83.12
2000	0.45	0.52	-0.39	-0.61	66.78	2019	0.55	0.43	-0.42	-0.58	83.33
2001	0.50	0.44	-0.47	-0.56	70.53	2020	0.55	0.44	-0.43	-0.57	82.83
2002	0.48	0.46	-0.45	-0.60	65.99	2021	0.57	0.43	-0.38	-0.60	82.50

PCI:第一主成分 Principal component 1; NDVI:归一化植被指数 Normalized difference vegetation index; WET:湿度 Wetness; LST:地表温度 Land surface temperature; NDBSI:归一化建筑裸土指数 Normalized difference built-up and soil index

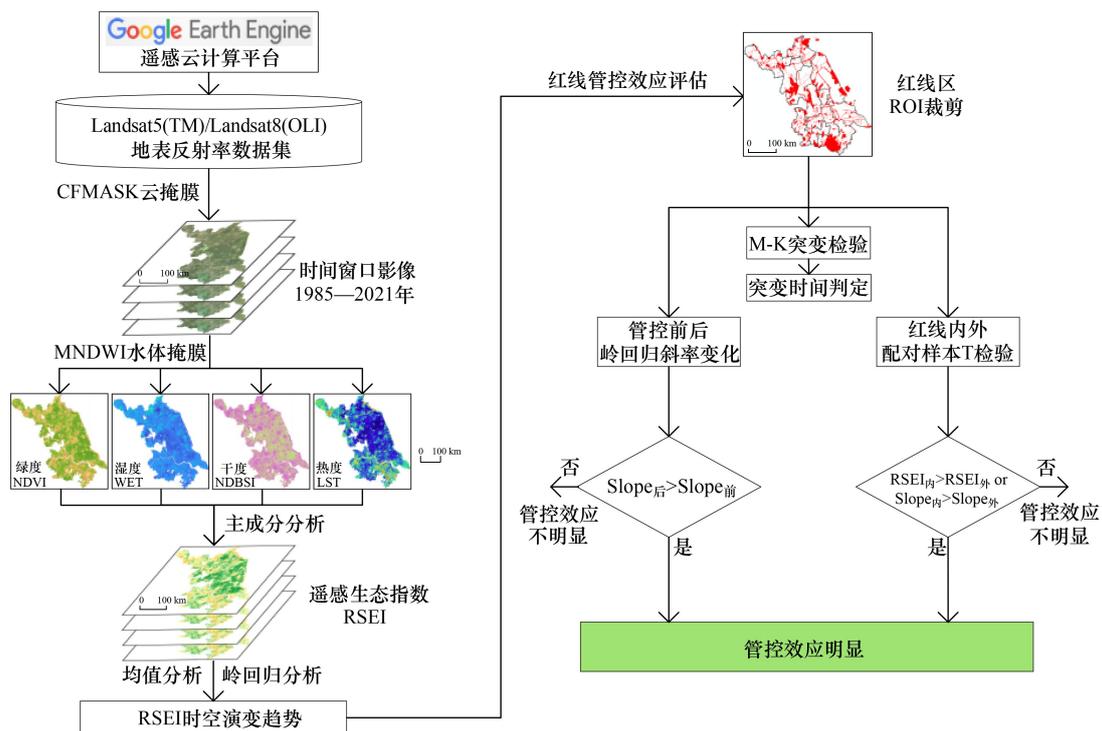


图2 “红线”管控效应评估技术路线

Fig.2 Technical route for assessing the controlling effect of “Red Line”

CFMASK:掩膜的C函数 C function of mask; MNDWI:改进的归一化水体差异指数 Modified normalized difference water index; NDVI:归一化植被指数 Normalized difference vegetation index; WET:湿度 Wetness; LST:地表温度 Land surface temperature; NDBSI:归一化建筑裸土指数 Normalized difference built-up and soil index; RSEI:遥感生态指数 Remote Sensing Ecological Index

3.2 江苏全域 RSEI 时空演变

计算了江苏全域 1985—2021 年间 RSEI 均值、岭回归趋势和变化显著性,如图 4 所示。RSEI 等级为差的地区主要集中在城镇区域和部分沿海滩涂,其中苏锡常、徐州和南京存在较大范围的连片生态质量差的区域。

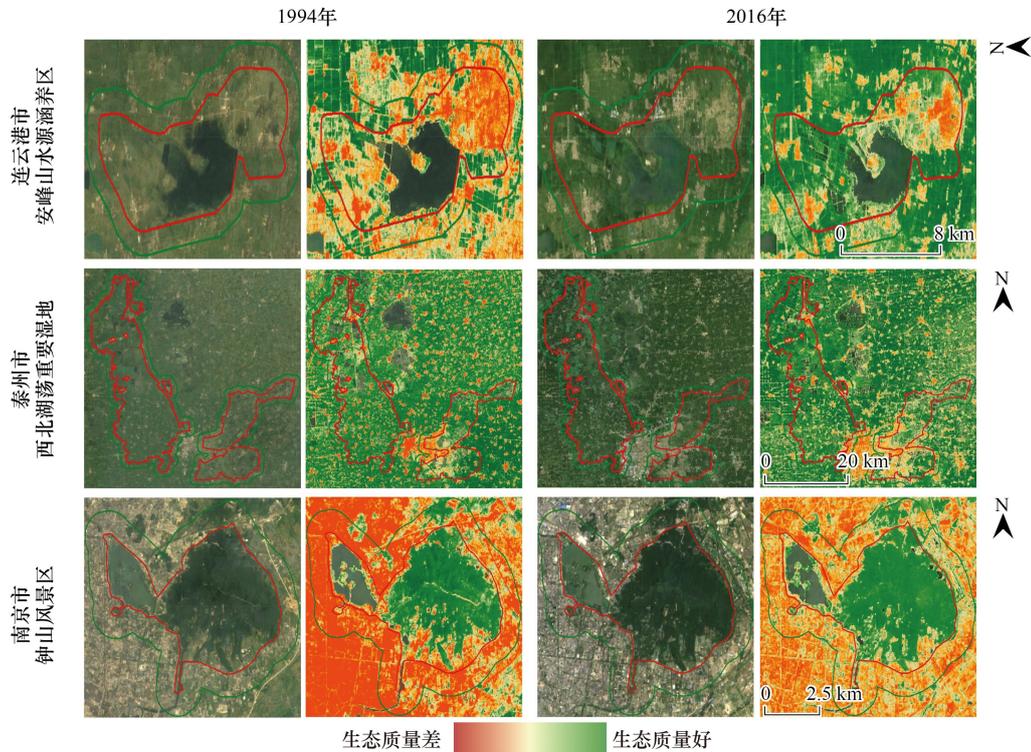


图3 红线区遥感影像(RGB合成)和RSEI影像(红线:红线区,绿线:1 km缓冲区)

Fig.3 Images of ecological redline zones (RGB) and the corresponding RSEI images (red line: ecological redline zone, green line: 1 km Buffer)

RGB: 红绿蓝波段 Red Green Blue bands;RSEI:遥感生态指数 Remote Sensing Ecological Index

岭回归趋势表明,1985年以来苏北地区的生态质量恢复较快,苏南和苏中地区则恶化较快,尤其是苏锡常和通泰地区恶化最为明显。值得注意的是,苏锡常地区的城镇生态质量处在缓慢上升中,城镇区域外的广大乡村地区则恶化较快,而苏北地区的城镇区域有所恶化,乡村地区生态转好。将RSEI趋势划分为显著降低(Slope<0, P<0.05)、不显著降低(Slope<0, P>0.05)、显著提升(Slope>0, P<0.05)、不显著提升(Slope>0, P>0.05)4个等级,苏南和苏中的大部分地区以显著降低为主,苏北以显著提升为主。其中提升面积占江苏总面积的58.2%,降低占41.8%,整体上呈微弱上升趋势。其中显著提升与降低的面积各占39.34%与25.89%,表明江苏半数以上的面积生态质量变化显著。

3.3 生态保护红线区RSEI年际变化

江苏全域红线区RSEI均值整体呈现出波动上升的趋势,2017年的最高值0.63相比1992年的最低值0.52上升了21.15%(图5)。可以看出,苏北城市的红线区普遍上升明显,其中宿迁上升速度最快。而南通则有一定程度的下降,这与其1991年以来经济发展迅速、进入城市化发展中期阶段的快速城市化进程密不可分^[43]。苏南城市除了省会南京其余城市的整体变化趋势都出现了下降,其中苏州的下降斜率为-0.00794,为13市之最。

由图6可得,江苏全域红线区RSEI均值的UF_k统计量在2003年之后持续高于0,表明在2003年后其整体生态质量有转好趋势,且在2007年后超出显著性水平,上升明显,结合Pettitt突变检验得出有效突变点为2003年。南京、连云港、徐州、宿迁、淮安、盐城、扬州的有效突变年份分别在2014年、1998年、2007年、2000年、2002年、2000年、2003年,且突变年份后UF_k曲线持续高于0,说明其红线区生态质量有转好趋势。而南通、常州、无锡、苏州的有效突变年份为1994年、1991年、1993年、1996年,突变年份后有变差的趋势。泰州和镇江结合两种方法均未检测出有效突变点。

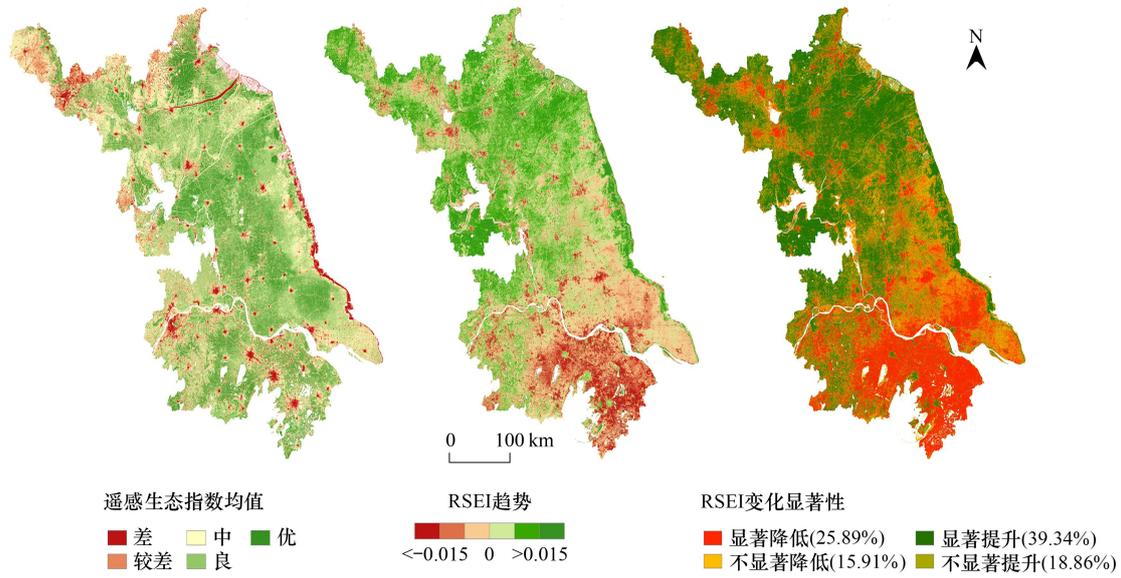


图 4 1985—2021 年江苏全域 RSEI 均值、变化趋势及变化显著性分布

Fig.4 Mean, trend and significant distribution of global RSEI in Jiangsu from 1985 to 2021

3.4 生态保护红线政策实施前后 RSEI 动态比较

以江苏省生态保护红线政策颁布的 2013 年为界,进行 1985—2011 年、2013—2021 年时段的 RSEI 岭回归趋势分析,统计每一地市红线区的 RSEI 斜率均值及对应的显著性面积占比(图 7)。将 RSEI 变化趋势划分为明显提升($Slope_{1985-2011} < 0, Slope_{2013-2021} > 0$)、加速提升($Slope_{2013-2021} > Slope_{1985-2011} > 0$)、缓速提升($Slope_{1985-2011} > Slope_{2013-2021} > 0$)、明显降低($Slope_{1985-2011} > 0, Slope_{2013-2021} < 0$)共 4 个类别,结果表明:苏州、无锡、常州、镇江和南通属于明显提升,南京、徐州、泰州为加速提升,连云港和淮安属于缓速提升,宿迁和扬州属于明显降低。显著性面积占比情况验证了上面的分析,如在 2013—2021 年间,苏州等地红线区的显著提升面积相比 1985—2011 年间大幅度增长,而宿迁等地则有一定的下降。

3.5 生态保护红线区斑块内外 RSEI 比较

3.5.1 RSEI 均值比较

本文计算了 33 个红线区斑块内与外 1 km 缓冲区的 RSEI 均值,观察其差异性及时随时间的变化,并进行配对样本 T 检验。由表 3 可得:红线区内与区外的配对样本差异显著($|t| > 1.96, P < 0.05$),且红线区内的 RSEI 均值显著高于外 1 km 缓冲区,表明“红线”的边缘效应真实存在。然而从时间阶段来看,1985—2011 年阶段“红线”两侧 RSEI 均值就有着显著差异,由于此时“红线”政策尚未在全省范围颁布实施,不能直接说明“红线”的管控效应,需对动态变化过程作进一步分析。

表 3 33 个红线区斑块 RSEI 均值配对样本 T 检验结果

Table 3 T-test results of paired samples for RSEI mean value in 33 ecological redline zone patches

时间 Time	配对样本数 Number of sample pairs	RSEI 均值 RSEI mean value		t	P
		红线区 Eco-redline zone	外 1 km 缓冲区 1 km buffer outside		
		1985—2021 年	33		
1985—2011 年	33	0.59913	0.53549	2.779	0.009
2013—2021 年	33	0.64703	0.57134	3.517	0.001

RSEI: 遥感生态指数 Remote sensing ecological index

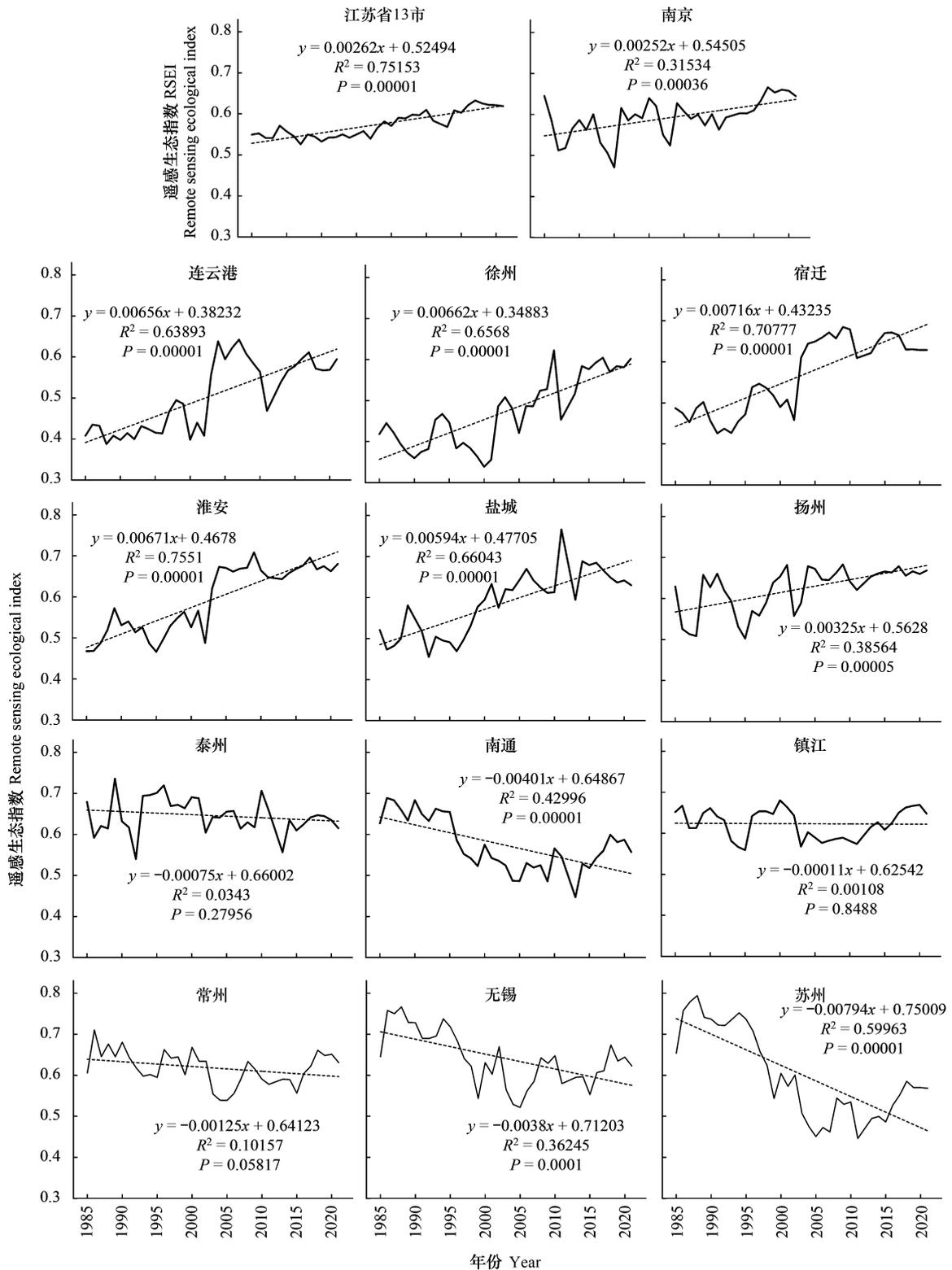


图 5 13 市红线区 RSEI 均值变化

Fig.5 Variation of RSEI mean value in the ecological redline zones of 13 cities

RSEI:遥感生态指数 Remote Sensing Ecological Index

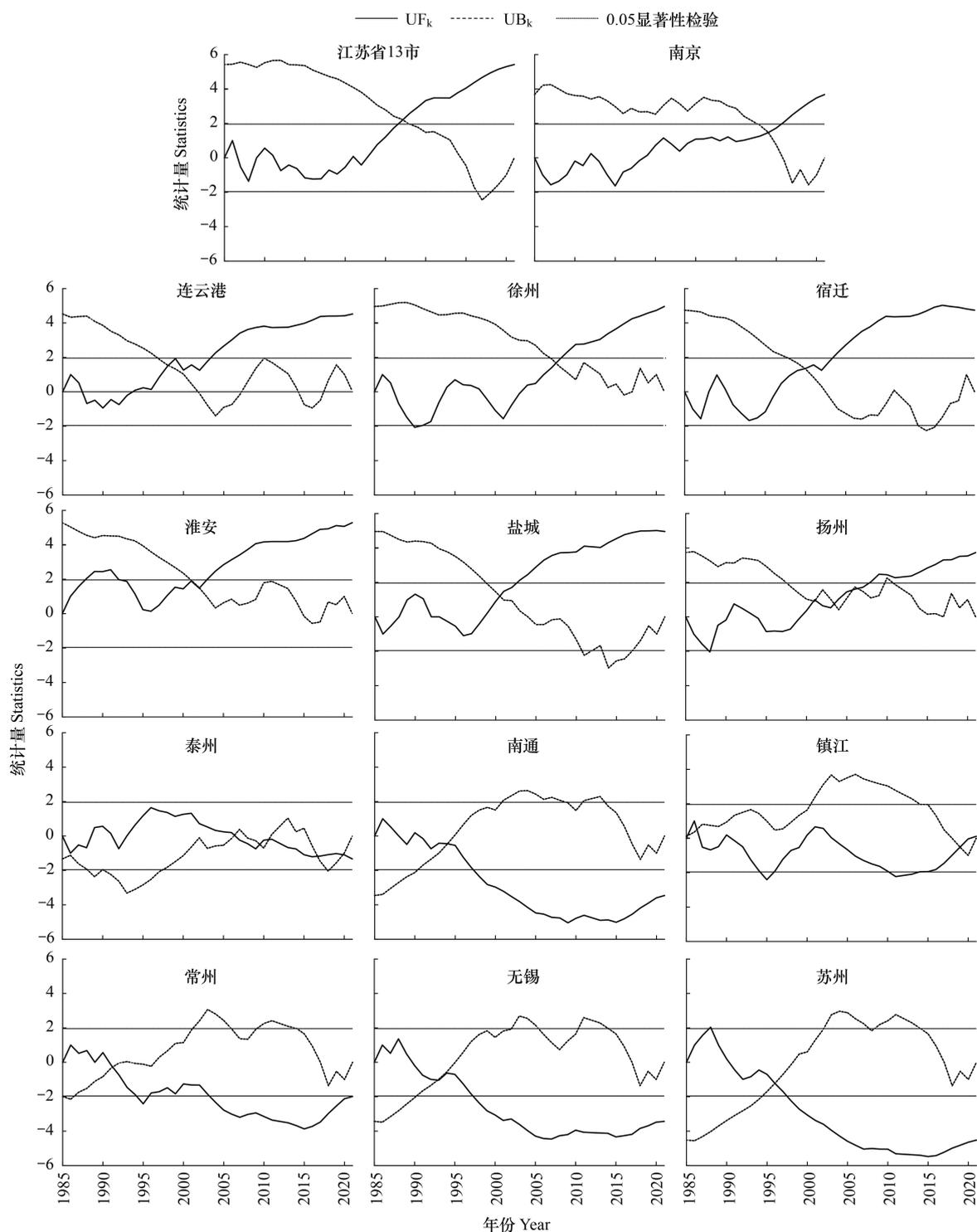


图6 RSEI 突变检验

Fig.6 RSEI mutation test

3.5.2 RSEI 变化率比较

从岭回归斜率配对样本 T 检验结果(表 4)可以看出,2013—2021 年红线区的 RSEI Slope 显著高于外 1 km 缓冲区 ($|t| > 1.96$, $P < 0.05$), 而整个 1985—2021 年阶段和 1985—2011 年阶段均没有显著差异 ($P > 0.05$), 表明“红线”的管控对红线区内 RSEI 增长趋势的有效性, 管控效应明显。

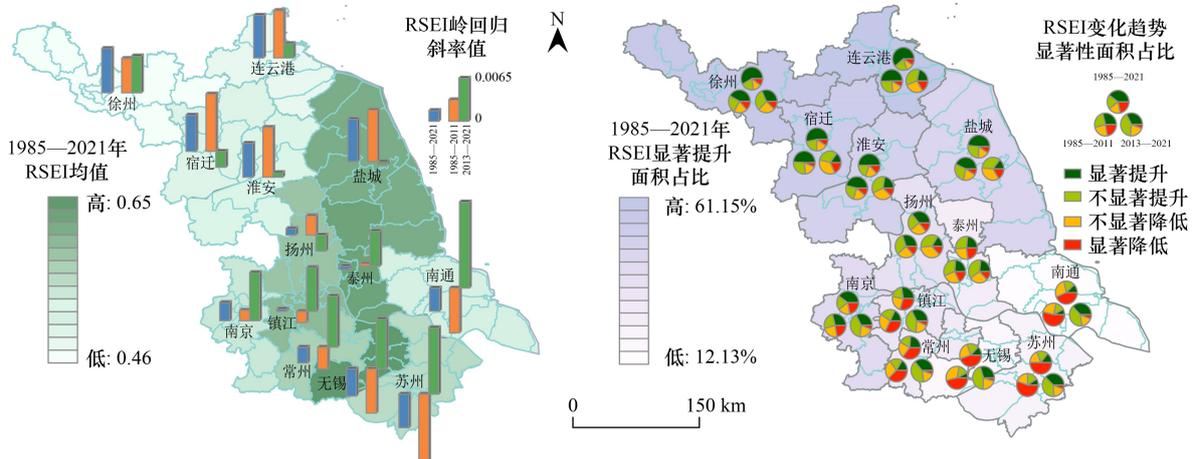


图7 13市红线区RSEI均值及变化率和显著性面积占比

Fig.7 RSEI mean value and change rate and the percentage of significantly changed area in the ecological redline zones of 13 cities

表4 33个红线区斑块RSEI变化趋势配对样本T检验结果

Table 4 T-test results of paired samples for RSEI change trend in 33 ecological redline zone patches

时间 Time	配对样本数 Number of sample pairs	RSEI Slope 均值 RSEI Slope mean value		t	P
		红线区 Eco-redline zone	外1 km缓冲区 1 km buffer outside		
		1985—2021年	33		
1985—2011年	33	0.00094	-0.00018	1.401	0.171
2013—2021年	33	0.00549	0.00437	2.250	0.031

表5 33个红线区斑块NDVI和NDBSI变化趋势配对样本T检验结果

Table 5 T-test results of paired samples for NDVI and NDBSI change trends in 33 ecological redline zone patches

时间 Time	配对样本数 Number of sample pairs	NDVI Slope 均值 NDVI Slope mean value		t	P
		红线区 Eco-redline zone	外1 km缓冲区 1 km buffer outside		
		1985—2021年	33		
1985—2011年	33	-0.00015	-0.00133	1.965	0.058
2013—2021年	33	0.00337	0.00292	0.701	0.488

时间 Time	配对样本数 Number of sample pairs	NDBSI Slope 均值 NDBSI Slope mean value		t	P
		红线区 Eco-redline zone	外1 km缓冲区 1 km buffer outside		
		1985—2021年	33		
1985—2011年	33	0.00009	0.00085	-1.001	0.324
2013—2021年	33	-0.00364	-0.00251	-2.216	0.034

NDVI:归一化植被指数 Normalized difference vegetation index;NDBSI:归一化建筑裸土指数 Normalized difference built-up and soil index

3.5.3 NDVI 与 NDBSI 变化率比较

对 NDVI 与 NDBSI 变化趋势的配对样本 T 检验结果(表 5)表明:NDVI Slope 在整个 1985—2021 年阶段,红线区内显著高于外 1 km 缓冲区($|t| > 1.96, P < 0.05$),表明红线区内植被长势快于外 1 km 缓冲区;1985—2011 年和 2013—2021 年阶段均没有显著差异($P > 0.05$),并且 2013 年后配对样本差异甚至变小($|t| = 0.701 < 1.965$),表明“红线”的管控效应对内外 NDVI 变化趋势的影响效果较小,对植被覆盖与长势作用不明显。NDBSI Slope 在整个 1985—2021 年和 1985—2011 年阶段均没有显著差异($P > 0.05$);而 2013—2021 年间,红

线区内的值显著低于外 1 km 缓冲区 ($|t| > 1.96$, $P < 0.05$), 表明“红线”在该时期发生屏蔽作用, 阻挡了建筑用地等不透水面和裸土向保护区内的侵蚀, “红线”的管控效应得以彰显。

4 讨论

4.1 “红线”管控效应及其作用机制

国家级生态保护红线是一种国土空间管理的政策工具, 主要目的是保护生态空间不受侵蚀。江苏在全国较早开展红线区的划定工作, 并在 2013 年以省政府文件的形式正式颁布了《江苏省生态红线区域保护规划》。这一规划文件不仅明确界定了红线区域范围、确立受保护的地位, 而且规定了分类分级管控措施^[44]。如对于一级管控区“实行最严格的管控措施, 严禁一切形式的开发建设活动”。之后的国家级生态保护红线划定基本沿用了 2013 版的主体内容, 同时综合了主体功能分区及沿海海洋功能区划的内容。因此, 2013 年可以作为江苏省生态保护红线政策实施的时间节点。本研究借助 GEE 平台的高算力和长时序遥感数据, 在 30 m 格点上计算逐年 RSEI 生态质量指数, 精确区分 2013 年前后及红线区内外的 RSEI 变化情况, 通过对 33 个样本区的均值及变化率的比较分析, 证实“红线”政策实施后 RSEI 有明显提升。尽管有研究^[11]报导过红线区 RSEI 的上升趋势, 但所采用的样本数量较少, 截取的时间段有限, 没有形成连续的证据说明“红线”政策的作用。本研究方法的另一突出贡献是: 在精细的空间分辨率数据支撑下开展了红线区内外的配对样本检验。而且结果显示红线区内的 RSEI 上升显著快于红线区外, 归一化建筑裸土指数 NDBSI 在红线区内的上升显著低于红线区外, 从而很好解释了“红线”政策在土地利用用途管制^[45-46]方面的功能, 也成为“红线”屏蔽建设开发活动的有力证据。

从理论上讲, 红线区域存在景观的边缘效应, 即受人为活动影响, 景观自然属性从中心向边缘递减。这在一定程度上会造成红线区内 RSEI 均值高于“红线”外区域。然而, 边缘效应不能解释红线区内外在 2013 年前后 RSEI 变化率的差异性, 以及 NDBSI 变化的内外差异。由此说明, “红线”作为人为划定的管理边界, 强化了同质要素跨界变化的差异性, 其作用机制相当于在“红线”内、外之间建立单向阻隔, 阻挡由外向内的空间相互作用, 降低人类活动对植被的破坏, 以及不透水面等城市用地扩张对生态区的侵蚀。同时也发现, 对不同区域和城市而言, “红线”的管控作用有所不同。如省会南京和苏南、苏中城市对“红线”管控的响应程度高, 2013 年后这些城市的红线区生态质量提升较快(图 7)。这可能与苏中和苏南城市政府的生态保护措施有关。因为自 1990 年代前期开始的苏中、苏南城市生态质量持续下降(图 5), 当地政府为遏制这一趋势, 对划定的红线区实施了更加严格的保护措施^[47], 结果是南通、苏州的红线区在 2013 年后超过 1/3 面积的生态质量为显著提升(图 7)。综合来看, “红线”政策及其管控效应大致遵循环境库兹涅茨曲线理论^[48], 即具有较强经济实力的城市, 在遭受生态质量恶化挑战后, 通过加强生态保护政策, 有效促进了生态质量的提升。

4.2 生态质量突变点和变化趋势

本文检测到的生态质量突变点是在 RSEI 均值的逐年分布上提取的数值突变点, 是复杂因素综合影响 RSEI 的结果。因此, 除了南京市域, 突变点出现的年份大多数不与“红线”政策开始实施的时间点重合。其中苏南、苏中城市红线区 RSEI 均值突变主要出现在 1990 年代, 由好向差突变; 苏北城市突变点主要出现在 2000 年代, 由差向好突变。改革开放以来苏南地区乡镇企业的蓬勃发展吸引了产业和大批劳动力的流入, 加上 1990 年代初全国性开发区大发展, 推动了区域城市化^[49], 使得大量耕地和生态用地转变为城镇用地, 其中苏州的耕地减少最快高达 5.87%^[50], 对生态质量造成负面影响, 导致苏州、无锡、常州和南通红线区 RSEI 均值在 1990 年代发生由好向差的突变。另一方面, 上世纪 80 年代以来开展的生态城市建设和 2000 年以来由中央政府主导在全国范围内推行的生态省、市、县建设一定程度上促进了城市生态质量的提升^[51], 且国务院于 2000 年颁布的《全国生态环境保护纲要》提出建立生态功能保护区^[52], 林业部门推动植树造林、提高森林覆盖率的工作^[53-54], 都使得生态质量位于较低水平的苏北五市红线区 RSEI 均值在 2000 年后发生由差向好的突变。苏南和苏中城市受到人口持续流入导致的人地矛盾^[55]和高城镇化水平^[56]影响, 生态环境压力巨

大,产生诸多生态问题^[57]。随着产业结构升级、经济增速趋缓和生态文明建设力度加大,2013年前后,包括苏州、无锡、常州、镇江等(图6)在内的苏南城市生态质量开始出现明显上升趋势。南京虽地处苏南,但与其他四市不同,其红线区生态质量整体上处于上升趋势。大规模的老城改造和园林绿化促使林草地等生态用地增加^[58],1995年以来生态质量不断提升。2013年以来相继发布的江苏生态红线区域保护规划和南京市生态文明建设规划(2013—2020年)^[59—60]进一步促进了生态用地建设,使得南京 RSEI 均值在 2014 年发生突变,加快了生态转好趋势。

4.3 红线区监测与评估建议

红线区生态质量在不同城市表现不同,江苏的研究表明城市扩展周期、生态保护政策力度和经济发展阶段等都会对红线区生态质量变化产生影响。对红线区生态质量的实时监测,有助于评估“红线”政策的管控效应,即时调整国土空间管控政策。本文可为相关部门开展基于遥感云计算的红线区生态质量业务化评估提供方法借鉴,但仍有可改进之处:如通过计算 RSEI 的变异系数以衡量红线区生态质量变化的稳定性;通过随机抽取同样面积、同一时段样本的方式进行红线区内外配对样本 T 检验,降低样本误差,增强结果的可靠性;尝试改变目前 RSEI 的计算过程中对水体的掩膜操作,改进生态质量指数,辅以 WBEI 指数^[61]等方法对太湖等水域面积占比较大的红线区进行顾及水生生态效益的生态质量评价。与此同时,在卫星观测的基础上辅以高分辨率无人机航拍及现场取证,建立生态保护红线监管台账^[62]体系,即时制止生态破坏行为。

5 结论

本文基于 GEE 平台构建长时序遥感生态指数,证实生态保护红线划定与保护政策的实施能显著提升区域生态质量,揭示了“红线”的屏蔽作用机制。该方法可用于“红线”监测和管控效应评估。具体结论如下:

(1) 针对江苏全域构建的 RSEI 模型 PC1 平均贡献率高于 70%,适用于江苏全域及生态保护红线区的生态质量演变分析。1985—2021 年生态质量提升的面积占江苏总面积的 58.2%,红线区平均 RSEI 值在 0.52—0.63 间变化,整体呈现波动上升的趋势。

(2) 除泰州和镇江外的其余 11 市生态保护红线区 RSEI 时序数据均检测到有效突变点,江苏全域红线区 RSEI 均值突变年份在 2003 年,各市红线区 RSEI 均值突变年份大多集中在 1995—2005 年间,1990 年代苏南和苏中部分城市出现由好向差的突变,2000 年代苏北城市出现由差向好的突变。

(3) 生态保护红线区遵循边缘效应,红线区内 RSEI 增长趋势显著高于“红线”外;且作为政策边界发挥了明显作用,有效阻挡了建筑用地等不透水面和裸土向保护区侵蚀,显著降低了红线区内 NDBSI 变化率。生态保护红线政策及其管控效应在具有较强经济实力的城市表现更加突出,能够促进生态质量的提升,13 地市中南通、苏州、无锡、常州、镇江为明显提升城市,南京、徐州和泰州为加速提升城市,连云港和淮安为缓速提升城市,“红线”政策在宿迁、扬州和盐城的作用不明显。

参考文献(References):

- [1] 姚士谋,张落成,陈爽,彭立华. 经济发达区内大都市用地空间的理性扩展. 地理科学, 2009, 29(5): 658-665.
- [2] 徐丽婷,姚士谋,陈爽,徐羽. 高质量发展下的生态城市评价——以长江三角洲城市群为例. 地理科学, 2019, 39(8): 1228-1237.
- [3] 陈爽,姚士谋,吴剑平. 南京城市用地增长管理机制与效能. 地理学报, 2009, 64(4): 487-497.
- [4] 杨小奇. 近十年我国生态保护与修复相关政策回顾与评述//中国风景园林学会 2017 年会议论文集. 北京:中国风景园林学会, 2017: 383-388.
- [5] Lin Q X, Eladawy A, Sha J M, Li X M, Wang J L, Kurbanov E, Thomas A. Remotely sensed ecological protection redline and security pattern construction: a comparative analysis of Pingtan (China) and Durban (south Africa). Remote Sensing, 2021, 13(15): 2865.
- [6] 张鹏,林聪,杜培军,王欣,唐鹏飞. 南京市生态红线区高分辨率遥感精准监测方法与应用. 国土资源遥感, 2020, 32(3): 157-164.
- [7] 张叶春,石晓峰. 江苏阳澄湖重要湿地生态红线典型区监测研究. 现代测绘, 2018, 41(1): 32-35.
- [8] 朱希希,程滢,卜伟,朱宇芳,孙海涛. 泰州全市及生态红线区“十二五”土地利用变化探究. 环境监测管理与技术, 2018, 30(4): 69-71.
- [9] 岳文泽,夏皓轩,吴桐,熊锦惠,钟鹏宇,陈阳. 浙江省生境质量时空演变与生态红线评估. 生态学报, 2022, 42(15): 6406-6417.

- [10] Yang M H, Xie Y. Spatial pattern change and ecosystem service value dynamics of ecological and non-ecological redline areas in Nanjing, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, 18(8): 4224.
- [11] 张鹏, 郭山川, 白旭宇, 林聪, 杜培军. 近 30a 内南京市生态红线区生态环境演变分析. *地理空间信息*, 2020, 18(3): 92-96, 8.
- [12] 林勇, 樊景凤, 温泉, 刘述锡, 李滨勇. 生态红线划分的理论和技术. *生态学报*, 2016, 36(5): 1244-1252.
- [13] 肖笃宁, 李秀珍, 高峻. *景观生态学*. 2 版. 北京: 科学出版社, 2010: 16-17.
- [14] 金奇豪, 汪倩旻, 李艺, 李杨帆. 中国沿海陆地自然保护区景观连接度评价. *地理学报*, 2021, 76(11): 2830-2840.
- [15] Hua T, Zhao W W, Cherubini F, Hu X P, Pereira P. Effectiveness of protected areas edges on vegetation greenness, cover and productivity on the Tibetan Plateau, China. *Landscape and Urban Planning*, 2022, 224: 104421.
- [16] 王成龙, 刘慧, 张梦天. 边界效应研究进展及展望. *地理科学进展*, 2016, 35(9): 1109-1118.
- [17] 傅伯杰. 中国各省区生态环境质量评价与排序. *中国人口·资源与环境*, 1992, 2(2): 48-54.
- [18] 朱晓华, 杨秀春, 刘天科. 江苏省生态环境质量动态变化驱动机制研究. *经济地理*, 2004, 24(4): 473-476.
- [19] 曹云, 孙应龙, 陈紫璇, 延昊, 钱拴. 2000—2020 年黄河流域植被生态质量变化及其对极端气候的响应. *生态学报*, 2022, 42(11): 4524-4535.
- [20] Wang C L, Jiang Q O, Deng X Z, Lv K X, Zhang Z H. Spatio-temporal evolution, future trend and phenology regularity of net primary productivity of forests in northeast China. *Remote Sensing*, 2020, 12(21): 3670.
- [21] 王志杰, 代磊. 黔中喀斯特山地城市土地利用/覆被变化及其生态效应评价——以贵阳市花溪区为例. *生态学报*, 2021, 41(9): 3429-3440.
- [22] 王美雅, 徐涵秋. 上海和纽约城市不透水面时空变化及其对生态质量影响的对比. *应用生态学报*, 2018, 29(11): 3735-3746.
- [23] 杨泽康, 田佳, 李万源, 苏文瑞, 郭睿妍, 刘文娟. 黄河流域生态环境质量时空格局与演变趋势. *生态学报*, 2021, 41(19): 7627-7636.
- [24] 刘轩, 岳德鹏, 马梦超. 基于变异系数法的北京市山区小流域生态环境质量评价. *西北林学院学报*, 2016, 31(2): 66-71, 294.
- [25] 崔世华, 于婧, 陈艳红, 韩晨晓. 基于熵权 TOPSIS 的湖北省城市人居环境质量时空分异研究. *华中师范大学学报: 自然科学版*, 2022, 56(4): 695-702, 716.
- [26] 徐涵秋. 城市遥感生态指数的创建及其应用. *生态学报*, 2013, 33(24): 7853-7862.
- [27] 付东杰, 肖寒, 苏奋振, 周成虎, 董金玮, 曾也鲁, 闫凯, 李世卫, 吴进, 吴文周, 颜风芹. 遥感云计算平台发展及地球科学应用. *遥感学报*, 2021, 25(1): 220-230.
- [28] 郑子豪, 吴志峰, 陈颖彪, 杨智威, Francesco Marinello. 基于 Google Earth Engine 的长三角城市群生态环境变化与城市化特征分析. *生态学报*, 2021, 41(2): 717-729.
- [29] 王渊, 赵宇豪, 吴健生. 基于 Google Earth Engine 云计算的城市群生态质量长时序动态监测——以粤港澳大湾区为例. *生态学报*, 2020, 40(23): 8461-8473.
- [30] Zhang Y, She J Y, Long X R, Zhang M. Spatio-temporal evolution and driving factors of eco-environmental quality based on RSEI in Chang-Zhu-Tan metropolitan circle, central China. *Ecological Indicators*, 2022, 144: 109436.
- [31] Zhou J B, Liu W Q. Monitoring and evaluation of eco-environment quality based on remote sensing-based ecological index (RSEI) in Taihu Lake basin, China. *Sustainability*, 2022, 14(9): 5642.
- [32] 刘小燕, 崔耀平, 董金玮, 史志方, 闰亚迪. 黄河中下游影响区生态空间和生态指数变化评估. *生态学报*, 2021, 41(20): 8030-8039.
- [33] Xiong Y, Xu W H, Lu N, Huang S D, Wu C, Wang L G, Dai F, Kou W L. Assessment of spatial-temporal changes of ecological environment quality based on RSEI and GEE: a case study in Erhai Lake Basin, Yunnan Province, China. *Ecological Indicators*, 2021, 125: 107518.
- [34] Yan Y Y, Zhuang Q W, Zan C J, Ren J, Yang L, Wen Y, Zeng S, Zhang Q, Kong L. Using the Google Earth Engine to rapidly monitor impacts of geohazards on ecological quality in highly susceptible areas. *Ecological Indicators*, 2021, 132: 108258.
- [35] Yao K X, Halike A, Chen L M, Wei Q Q. Spatiotemporal changes of eco-environmental quality based on remote sensing-based ecological index in the Hotan Oasis, Xinjiang. *Journal of Arid Land*, 2022, 14(3): 262-283.
- [36] 汪东川, 陈星, 孙志超, 辛燕, 王海庆, 柴华, 王鸿艺. 格尔木长时间序列遥感生态指数变化监测. *生态学报*, 2022, 42(14): 5922-5933.
- [37] 省政府关于印发江苏省生态红线区域保护规划的通知. *江苏省人民政府公报*, 2013(23): 11-20.
- [38] 徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究. *遥感学报*, 2005, 9(5): 589-595.
- [39] 武文昊, 黄瑞芬. 多源遥感数据的温度反演算法与分析. *辽宁林业科技*, 2017(1): 19-22.
- [40] Sobrino J A, Jiménez-Muñoz J C, Paolini L. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 90(4): 434-440.
- [41] Pettitt A N. A non-parametric approach to the change-point problem. *Applied Statistics*, 1979, 28(2): 126.
- [42] 冷雪, 庞亮, 姜欣彤, 董胜. 1956—2018 年青海省黄河流域降水变化特征分析及预测. *中国海洋大学学报: 自然科学版*, 2022, 52(2): 23-32.

- [43] 刘馨. 城市化进程中用地保障研究——以南通市为例[D]. 南京: 南京农业大学, 2007.
- [44] 燕守广, 林乃峰, 沈渭寿. 江苏省生态红线区域划分与保护. 生态与农村环境学报, 2014, 30(3): 294-299.
- [45] 孟祥舟, 林家彬. 对完善我国土地用途管制制度的思考. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(S1): 71-73.
- [46] 陈群弟, 陈露, 余炜楷. 国土空间用途管制的演变特征和路径选择——从土地利用规划到国土空间规划. 2019 城市发展与规划论文集. 郑州, 2019: 1299-1303.
- [47] 蒋舟俊. 县域城市生态红线区域保护问题研究——以苏南县市实践为例. 改革与开放, 2014(19): 29-31.
- [48] 胡聃, 许开鹏, 杨建新, 刘天星. 经济发展对环境质量的影响——环境库兹涅茨曲线国内外研究进展. 生态学报, 2004, 24(6): 1259-1266.
- [49] 陈爽, 姚士谋. 长江三角洲城市可持续发展的问题与对策. 现代城市研究, 1997, 12(4): 4-7, 14.
- [50] 陈宁强, 戴锦芳. 苏南现代化进程中的遥感土地利用动态监测——以苏、锡、常地区为例. 长江流域资源与环境, 1999, 8(3): 288-293.
- [51] 国家环境保护总局. 生态县、生态市、生态省建设指标(试行). 环境保护, 2003, 31(9): 21-28.
- [52] 岩流. 《全国生态环境保护纲要》环境理论上的重大突破和创新. 中国环境管理, 2002(2): 3-7.
- [53] 中共中央国务院关于加快林业发展的决定. 广西林业, 2004(2): 4-5.
- [54] 孟广芹. 全力加快林业发展全面建设绿色江苏——访全国人大代表、江苏省委书记李源潮. 中国绿色时报, 2005-03-11. http://www.greentimes.com/greentimepaper/html/2005-03/11/content_3082557.htm.
- [55] 刘自洁. 苏南地区农业循环经济发展途径的探讨. 现代农业科技, 2009(2): 246-247, 249.
- [56] 丁惠. 江苏省生态环境质量及影响因素研究[D]. 南京: 南京财经大学, 2020.
- [57] 王玉莹, 金晓斌, 沈春竹, 鲍桂叶, 刘晶, 周寅康. 东部发达区生态安全格局构建——以苏南地区为例. 生态学报, 2019, 39(7): 2298-2310.
- [58] 沈佩姗. 区域土地覆盖变化及其生态环境质量评价——以南京市为例[D]. 南京: 南京邮电大学, 2020.
- [59] 秦洁琼, 于忠华, 孙瑞玲, 姚利鹏. 南京市改善生态环境的政策制度研究. 绿色科技, 2019(16): 71-73.
- [60] 林震, 双志敏. 省会城市生态文明建设评价指标体系比较研究——以贵阳市、杭州市和南京市为例. 北京航空航天大学学报: 社会科学版, 2014, 27(5): 22-28.
- [61] Jiao Z J, Sun G Y, Zhang A Z, Jia X P, Huang H, Yao Y J. Water Benefit-Based Ecological Index for Urban Ecological Environment Quality Assessments. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2021, 14: 7557-7569.
- [62] 史园莉, 高吉喜, 张文国, 申振, 申文明, 张宏伟, 肖桐, 马万栋, 蔡明勇, 毕晓玲, 任致华. 生态保护红线监管台账关键技术研究与应用. 生态学报, 2022, 42(21): 8892-8901.