

1999—2020 年长江经济带（江苏段）生态环境 变化监测及人类 活动驱动分析¹

宋珂^{1,2}, 王玉军^{1,2}, 李胤^{1,2}

(1. 江苏省地质调查研究院, 江苏南京 210018;

2. 自然资源江苏省卫星应用技术中心, 江苏 南京 210018)

【摘要】协调区域城镇化与生态环境保护之间的关系, 是推动我国长江经济带可持续发展的核心问题之一。针对现有研究中, 生态环境变化与人类活动驱动之间的响应关系缺少时空对应的数据支持、影响过程不明的问题, 本文充分利用多源卫星遥感技术在处理和提取时空信息上的优势, 以长江经济带江苏段沿江县区为例, 利用 1999—2000 年, 2009—2010 年和 2019—2020 年 3 期 Landsat 系列遥感影像, 通过 RSEI 模型定量分析研究区 1999—2020 年间区域生态环境时空变化规律, 并引入人工不透水面 (IS) 及夜景灯光 (NTL) 等时空信息指标, 定义各县区 IS 面积占比和 IS 区域 NTL 辐亮度均值, 用于定量探究不同区域、不同强度下人类活动 (城镇化) 对生态环境的影响。研究结果表明: ①1999—2020 年间, 江苏省沿江各区县城镇化区域及其周边区域生态环境质量下降趋势明显。其中, 2000—2009 年间, 研究区各县区 IS 区域面积快速增加, 导致其区域生态环境质量明显下降。而 2010—2020 年间, 部分城镇化区域绿化面积增加, 促使其区域生态环境质量缓慢提升。②研究区各县区 IS 面积占比与其 RSEI 均值呈现明显函数负相关性, 而 IS 区域 NTL 辐亮度均值与其 RSEI 均值的函数负相关性相对减弱, 尤其是 IS 面积占比超 0.3 的县区, 城镇化与生态环境交互耦合关系复杂性增强, 其详细函数模型需进一步研究。

【关键词】城镇化; 生态环境; RSEI; 长江经济带; 人工不透水面; 夜景灯光

【中图分类号】P237 **【文献标识码】**A **【文章编号】**0494-0911 (2021) 02-0007-06

改革开放以来, 我国城镇化进程快速发展, 强烈的人类活动干扰给区域生态环境造成明显负面影响^[1-3]。应用遥感技术及时、有效、多尺度监测区域生态环境变化并探究问题根源, 成为目前支撑区域生态环境系统保护的重要手段^[4-6]。

近些年, 基于遥感的生态环境指数 (ecological index, EI) 在区域生态环境监测领域得到广泛应用。2013 年, 文献^[5]构建了一种完全基于遥感信息的遥感生态指数 (remote sensing ecology index, RSEI) 以快速监测与评价区域生态环境质量。RSEI 模型已成功用于矿区^[7]、水电开发区^[8]、草原^[9]、湿地^[10]、流域^[11]和城市^[12]等区域生态环境变化监测与评估。

¹收稿日期: 2020-08-28; 修回日期: 20204246

基金项目: 2019 年江苏省地质勘查专项资金; 2019 年江苏省地质勘查专项资金

作者简介: 宋珂 (1982—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事遥感和 GIS 在资源环境方面的应用研究。E-mail: 479506651@qq.com

目前,国内学者已经开展了大量基于 RSEI 模型的城市化进程与区域生态环境相关性的研究。如,文献^[13]研究表明,渭南市 1995—2015 年生态环境质量(RSEI)受城市规划建设影响较大;文献^[14]研究表明,厦门岛 1996—2015 年城市发展过程中,通过有效提升城市绿度空间促使其生态环境(RSEI)总体较为稳定;文献^[15]研究表明,2001—2018 年苏锡常城市群的植被覆盖是改善生态环境质量(RSEI)的关键;文献^[16]研究发现,2005—2015 年武汉市生态环境质量(RSEI)呈现由中心城区向沿长江和汉江不断向外扩张的趋势。

相对于区域生态环境遥感监测,人类活动强度对区域生态环境的影响评估则主要依赖于区域社会经济统计数据。如,文献^[17]对长江经济带沿线省市进行综合发展水平评价;文献^[18]对经济发展、资源禀赋和生态环境三系统间的耦合度和协调度进行空间分析;文献^[19]从不同尺度分析生态文明建设和协调发展的时空演化规律。

综上所述,基于 RSEI 模型的城市化进程与区域生态环境相关性研究已相对成熟^[20-23],但定量分析人类活动对区域生态环境质量时空变化影响的研究相对较少。现有少量关于地理空间异质性的研究^[17-26]。因此,本文将充分利用卫星遥感技术在处理和提取时空信息上的优势,采用 RSEI 模型对 1999—2020 年长江经济带(江苏段)生态环境进行监测评估,剖析该区域近 20 年间生态环境质量时空变化过程,并结合人工不透水面(imperious surface, IS)及夜景灯光(nighttime light, NTL)数据,定量探究人类活动对生态环境变化的驱动效应,为该区域生态安全与经济社会可持续发展提供科学依据。

1 研究区与数据源

1.1 研究区概况

江苏省地处长江经济带下游地区,是我国东部社会与经济最发达的省份之一(2019 年全省 GDP 高达 99631.52 亿元,高居全国第二)。同时,该省沿江区域经济发展水平高,城市化综合开发利用程度高,经济发展与生态保护矛盾日趋加剧^[17,24-25]。本文选择江苏省沿江区域为研究区(如图 1 所示),涉及南京、镇江、扬州、常州、无锡、苏州、泰州、南通等地级市的 33 个县,区域面积约为 $2.47 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

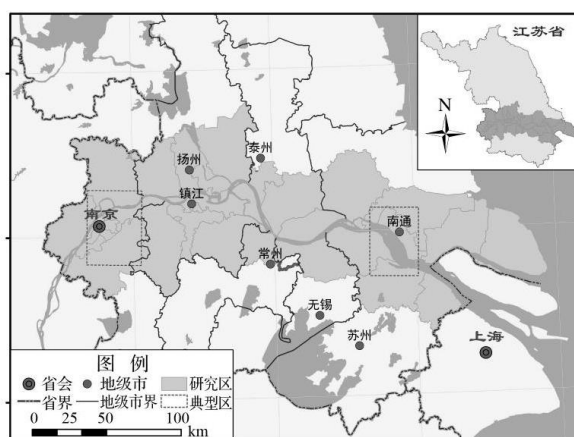


图 1 研究区地理位置

1.2 研究区数据源

考虑研究时期跨度大(2000—2020 年)和区域范围大($2.47 \times 10^4 \text{ km}^2$),本文将利用 2000 年、2010 年及 2020 年 3 期 Landsat 系列卫星遥感影像,对研究区生态环境变换过程进行监测与评估。同时,参考 2015 年人工不透水面(MSMT_IS30-2015)数据^[27]和 2018

年珞珈一号 (LJ-01 CMOS) 夜光遥感影像, 用于定量探究人类活动对生态环境的干扰强度。

2 研究方法

RSEI 模型选取与人类活动息息相关, 并且反映生态环境质量的 4 大生态指标: 绿度 (Greenness)、湿度 (Wetness)、热度 (Heat) 和干度 (Dryness), 通过 PCA 自动量化各生态指标贡献度, 构建 RSEI 评估函数^[4-5], 即

$$RSEI = f(\text{Greenness}, \text{Wetness}, \text{Heat}, \text{Dryness}) \quad (1)$$

考虑遥感影像是地表综合体 (生物、地质、水文、地貌、人文等) 反射、发射电磁波谱特性的记录与表达, 利用遥感影像数据反演计算植被指数 (vegetation index, VI)、建筑物-裸土指数 (building-soil index, BSI)、湿度分量 (Wet) 和地表温度 (land surface temperature, LST), 能够直观、快速、有效地监测与评估区域生态环境状况, 并用于分别代表 Greenness、Wetness、Heat 和 Dryness^[4-10]。因此, RSEI 遥感评估目标函数为

$$RSEI = f(\text{VI}, \text{Wet}, \text{LST}, \text{BSI}) \quad (2)$$

式中, VI 为植被指数; Wet 为湿度分量; LST 为地表温度; BSI 为建筑物-裸土指数。以上指标与人类的生存息息相关, 是直观感觉生态优劣的指标。

实际在 RSEI 建模过程中, 由于各生态指标的量纲和数值差异, 需要进行归一化处理, 其计算公式为

$$x_i = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (3)$$

式中, x_i 为归一化后的生态指标值; X_i 为原始生态指标值; $X_{\min}$ 为原始生态指标的最小值; $X_{\max}$ 为原始生态指标的最大值。经过归一化处理的生态指标 (VI、Wet、LST 和 BSI) 将用于 PCA, 并选取第一主成分 PC1 表征区域生态环境质量, 将 PC1 预处理后作为初始生态指数 $RSEI_0$, 其预处理公式为

$$RSEI_0 = 1 - \{PC1 [f(\text{NDVI}, \text{Wet}, \text{LST}, \text{BSI})]\} \quad (4)$$

为便于 $RSEI_0$ 指标的度量和比较分析, 可将 $RSEI_0$ 进行归一化处理, 其公式为

$$RSEI = \frac{RSEI_0 - RSEI_{0_{\min}}}{RSEI_{0_{\max}} - RSEI_{0_{\min}}} \quad (5)$$

式中, RSEI 为区域生态环境监测与评估数值, 其值域范围为 $[0, 1]$; RSEI 值越接近于 1, 表示生态环境质量越好。本文选用 ENVI5.3 平台运行生态指标计算与 RSEI 建模过程, 实现研究区生态环境状况的 RSEI 监测与评估(如图 2 所示)。

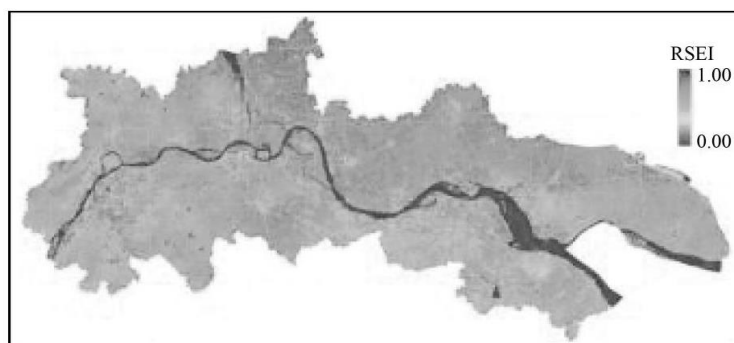
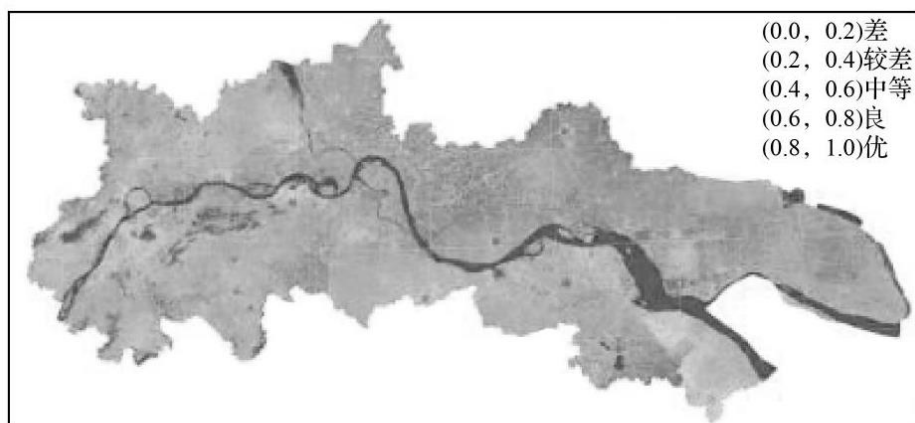


图 2 基于 RSEI 模型的研究区生态环境状况监测与评估

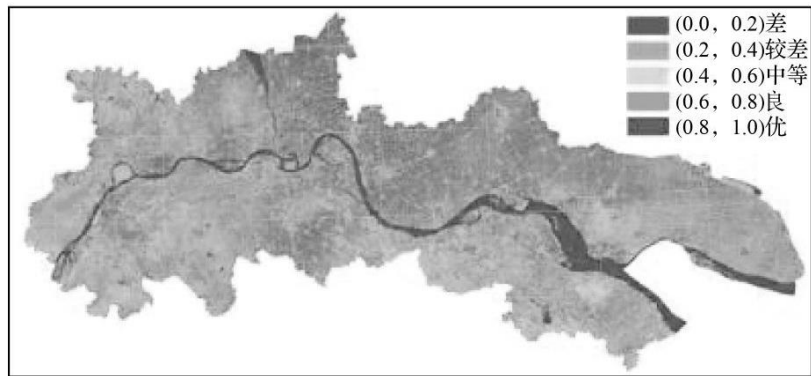
3 结果分析与讨论

3.1 区域生态环境质量变化时空分析

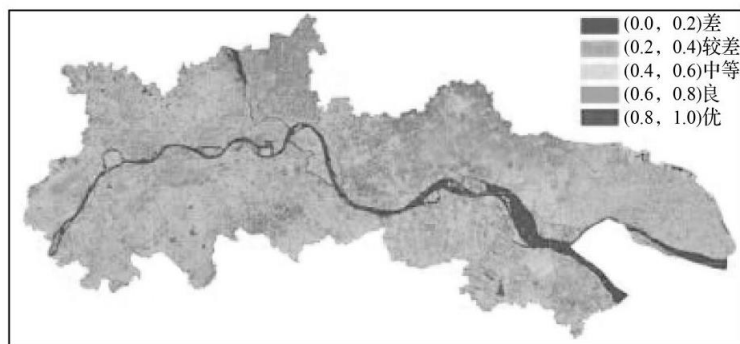
为对比分析研究区 1999—2000 年、2009—2010 年 2019—2020 年 3 期区域生态环境状况, 本文还将 RSEI 监测与评估数值结果以 0.2 为间隔划分成差、较差、中等、良、优 5 个生态等级(如图 3 所示)。



(a) 1999—2000 年生态质量分级



(b) 2009—2010年生态质量分级



(c) 2019—2020年生态质量分级

图 3 研究区 1999—2020 年生态环境质量时空变化过程

为探究生态环境质量差异变化过程, 本文将不同时期的 RSEI 数值变化大小进行了分级统计, 研究区统计数据表明 (见表 1): ①1999—2020 年间, 区域生态环境质量整体呈现下降趋势, RSEI 降低差值范围集中为 (0.05, 0.4] ②1999—2020 年间, 部分区域生态环境质量也呈现提高现象, 但 RSEI 降低差值范围集中为 [-0.2, -0.05)。

综合统计分析结果, 结合研究区 RSEI 等级空间分布 (如图 3 所示) 进一步分析表明: ①1999—2020 年间, 研究区生态环境质量呈现下降趋势, 生态环境质量等级呈现由良至优 (4~5 级) 向差至较差 (2~3 级) 转变, 变化区域集中城市建筑区域及周边区域。②2009—2020 年, 部分区域生态环境质量出现提升现象, 1999—2010 年农田种植区 RSEI 值出现上升现象, 2009—2020 年部分城市区域 RSEI 值也呈现提升现象。

表 1 研究区 1999—2020 年间生态环境 RSEI 差值变化统计

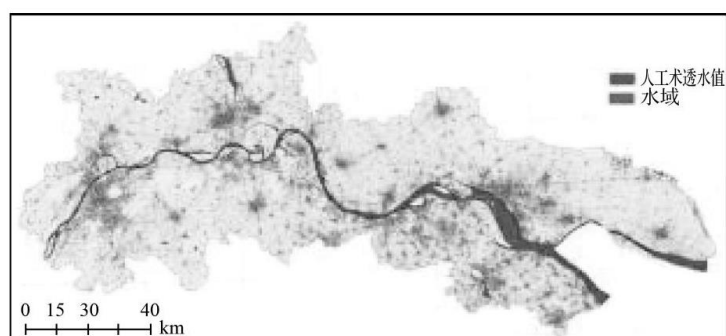
差别	RSEI 差	1999—2010		2009—2020		1999—2020	
		面积/km ²	占比/(%)	面积/km ²	占比/(%)	面积/km ²	占比/(%)
变好	[-1.0, -0.6)	109.0	0.48	69.6	0.31	140.4	0.62
	[-0.6, -0.4)	348.9	1.54	321.5	1.42	403.6	1.78
	[-0.4, -0.2)	2001.0	8.84	1411.3	6.24	1812.1	8.01
	[-0.2, -0.05)	6222.6	27.51	4058.3	17.94	4142.4	18.31
基本不变	[-0.05, 0.05]	5544.4	24.51	5499.3	24.31	3847.6	17.01
	(0.05, 0.2)	4988.1	22.05	6261.3	27.68	5740.1	25.37

变差	[0.2, 0.4)	2294.1	10.14	3175.5	14.04	4145.6	18.32
	[0.4, 0.6)	856.8	3.79	1346.7	5.95	1762.7	7.79
	[0.6, 1.0]	258.3	1.1	479.9	2.1	628.5	2.8

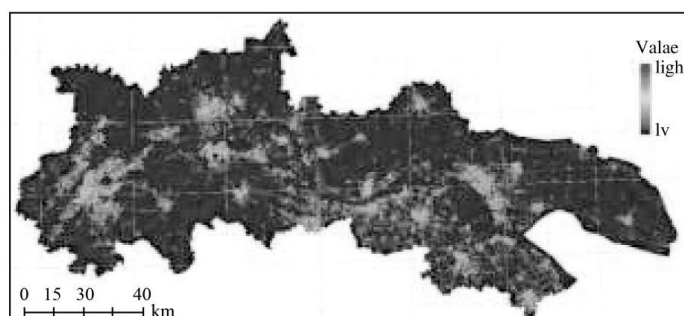
3.2 人类活动对区域生态环境的干扰分析

基于“城镇化与生态环境系统是交互耦合、胁迫发展耗散结构体”视角^[1,3,28]的分析如下:①城镇化通过人口增长、经济发展、资源能源消耗和地域扩张对生态环境产生胁迫作用。②生态环境通过环境选择、人口驱逐、资金争夺和政策干预对城镇发展产生约束。为探究研究区城镇化与生态环境相互间的交互耦合关系, 本文将以不透水面 (IS) 和夜景灯光 (NTL) 遥感影像 (如图 4 所示) 为基础, 初步探讨城镇化进程中人类活动区、干扰强度对生态环境质量的影响。

首先, 本文设定“IS 分布区是人类活动干扰的主要区域, 并且 IS 发展趋势为以原有 IS 区域不断向外围发展”, 以 2015 年 IS 分布数据 (MSMT_IS30-2015)^[27] 作为 1999—2020 年研究区各县区人类活动区域的参考数据。然后, 统计分析研究区各县区 IS 面积占比 (单位面积内 IS 分布区所占比例) 与不同时期 RSEI 监测评估均值。分析结果 (如图 5 所示) 表明: ①2015 年各县区 IS 占比与不同时期 RSEI 均值呈现明显负相关性, 并且各县区 IS 占比与 1999—2000 年, 2019—2020 年间 RSEI 均值呈现相似负相关趋势, 而 2009—2010 年间 RSEI 均值与 IS 占比相关趋势明显区别于 1999—2000 年, 2019—2020 年间。②考虑区域城镇化发展进程的空间相关性及其对生态环境胁迫程度, 研究区各县区 RSEI 均值与其 IS 占比的模拟函数变化趋势能够反映城镇化进程对其区域生态环境质量的影响差异, 尤其是 2009—2010 年间各县区 RSEI 均值与其 IS 占比函数变化趋势, 能够反映研究区 2000—2009 年间各县区 IS 区域快速扩张, 其对区域生态环境质量的干扰较为强烈。



(a) 2015年度研究区人工不透水值提取影像(MSMT_IS30-2015)



(b) 2018年塔峰一号(LJ-01 CMOS)夜光遥感影像

图 4 研究区 2015 年 IS 与 2018 年 NTL 数据

为进一步探究人类活动强度对生态环境的影响,本文设定:NTL 辐射强度能够反映人类活动强度。并以 2018 年 7 月 14—15HU01-CMOS 数据作为研究区各县区人类活动强度的参考数据。然后统计分析各县区 IS 区域 NTL 辐亮度均值与不同时期 RSEI 监测评估均值。

结果(如图 6 所示)表明:①各县区 IS 区域 NTL 辐亮度均值与不同时期 RSEI 均值呈现一定的负相关性,与图 5 相关趋势相似,1999—2000 年间、2019—2020 年间 RSEI 均值与 NTL 辐亮度均值呈现相似相关趋势。②考虑 2018 年 IS 数据的时效局限,结合图 5 分析可知,人类活动区域(IS)扩张对生态环境干扰差异较大,而人类活动强度对生态环境质量的影响作用相对减弱,尤其是 IS 面积占比超 0.3 的区域人类活动强度与生态环境相关性相对不明显(如玄武区、秦淮区和鼓楼区等)。③考虑人类活动强度与社会经济发展的相关性,本文初步推测为 IS 占比大于 0.3 的各县区是人类活动强度较高的区域,人类活动对生态环境胁迫压力较强,同时对生态环境的修复与保护能力(区域绿化)也较强。

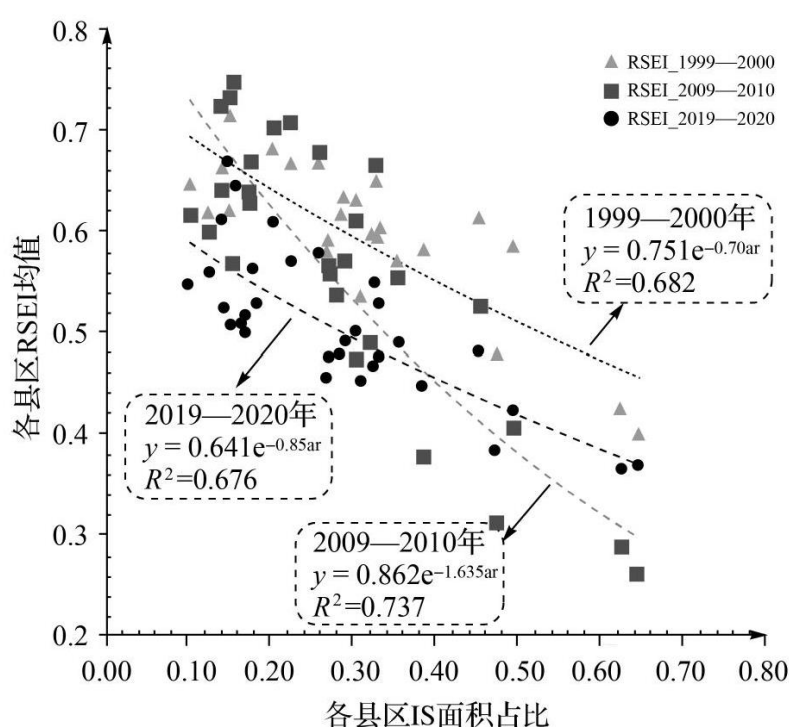


图 5 2015 年各县区 IS 占比与不同时期 RSEI 统计关系

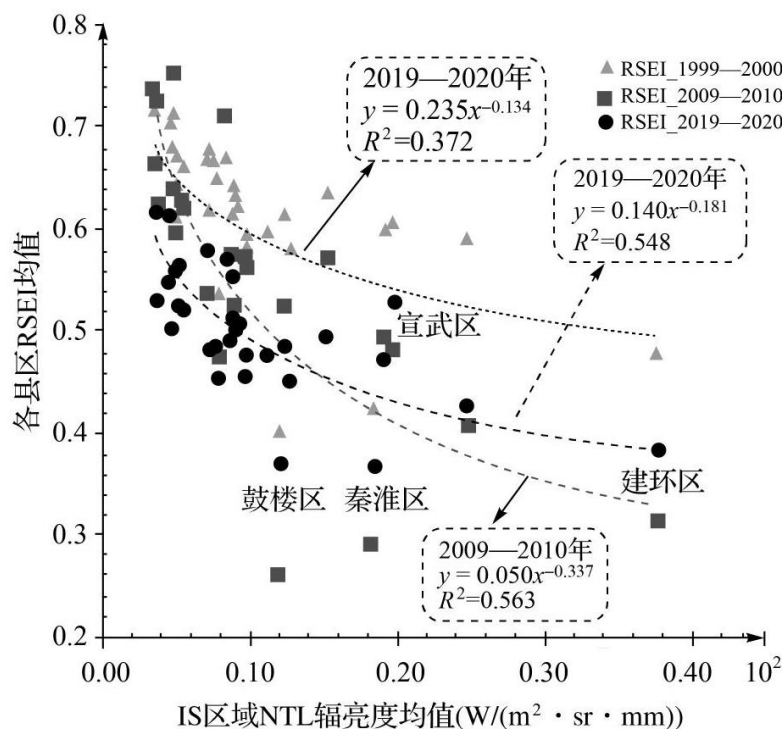


图 6 2018 年各县区 IS 区域 NTL 辐亮度均值与不同时期 RSEI 统计关系

综上所述表明:研究区在 1999—2020 年城镇化进程中,人类活动区域的迅速扩张对区域生态环境质量胁迫干扰较强,并且各县区 IS 占比与其区域生态环境质量呈现明显负相关性,尤其研究区在 2000—2009 年间 IS 区域迅速扩张对其区域生态环境质量造成较强负面影响。同时,人类活动区域的活动强度对其生态环境质量也有一定的负面干扰影响,但其干扰程度相对减弱,尤其在 IS 占比超 0.3 的县区,人类活动对区域生态环境胁迫较强,对其修复与保护能力也较强。

4 结论

本文利用 1999—2000 年、2009—2010 年和 2019—2020 年间 3 期 Landsat 系列遥感影像,应用 RSEI 模型对长江经济带(江苏段)区域生态环境进行监测与评估,并结合人工不透水面 (IS) 和夜景灯光 (NTL) 数据,剖析了 1999—2020 年间研究区生态环境变化时空规律及其驱动因素。基于现有数据,本文主要结论为:

(1) 1999—2020 年间,江苏省沿江各区县城镇化区域及其周边区域生态环境质量下降趋势明显;其中,2000—2009 年间,研究区各县区 IS 区域面积快速增加,导致其区域生态环境质量明显下降;而 2010—2020 年间,部分城镇化绿化区域面积增加,促使其区域生态环境质量缓慢提升。

(2) 研究区各县区 IS 面积占比与 IS 区域 NTL 辐亮度均值能够作为反映其城镇化进程中人类活动区域及其活动强度的定量参数,并且研究区各县区 IS 面积占比与其 RSEI 均值呈现明显函数负相关性,而 IS 区域 NTL 辐亮度均值与其 RSEI 均值的函数负相关性相对减弱。尤其是 IS 面积占比超 0.3 的县区,城镇化与生态环境交互耦合关系复杂性增强,其详细函数模型需进一步研究。

参考文献:

-
- [1]刘耀彬,李仁东,宋学锋.中国区域城市化与生态环境耦合的关联分析[J].地理学报,2005,60(2):237247.
- [2]乔标,方创琳.城市化与生态环境协调发展的动态耦合模型及其在干旱区的应用[J].生态学报,2005,25(11):3003-3009.
- [3]方创琳,周成虎,顾朝林,等.特大城市群地区城镇化与生态环境交互耦合效应解析的理论框架及技术路径[J].地理学报,2016,71(4):531-550.
- [4]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):7853-7862.
- [5]徐涵秋.区域生态环境变化的遥感评价指数[J].中国环境科学,2013,33(5):889-897.
- [6]徐涵秋,施婷婷,王美雅,等.雄安新区地表覆盖变化及其新区规划的生态响应预测[J].生态学报,2017,37(19):6289-6301.
- [7]吴志杰,王猛猛,陈绍杰,等.基于遥感生态指数的永定矿区生态变化监测与评价[J].生态科学,2016,35(5):200-207.
- [8]刘索玄,袁艳斌,赵喆,等.基于遥感生态指数(RSEI)的水电开发区生态环境变化分析:以清江中下游地区为例[J].生态与农村环境学报,2019,35(11):1361-1368.
- [9]宋美杰,罗艳云,段利民.基于改进遥感生态指数模型的锡林郭勒草原生态环境评价[J].干旱区研究,2019,36(6):1521-1527.
- [10]王丽春,焦黎,来风兵,等.基于遥感生态指数的新疆玛纳斯湖湿地生态变化评价[J].生态学报,2019,39(8):2963-2972.
- [11]施婷婷,徐涵秋,孙凤琴,等.建设项目引发的区域生态变化的遥感评估—以敖江流域为例[J].生态学报,2019,39(18):6826-6839.
- [12]程朋根,岳琛,危小建,等.尺度变化对城市生态环境与人类活动关系的影响研究[J].测绘通报,2020(3):56-63.
- [13]宋慧敏,薛亮.基于遥感生态指数模型的渭南市生态环境质量动态监测与分析[J].应用生态学报,2016,27(12):3913-3919.
- [14]林中立,徐涵秋.基于遥感的海岛型城市发展生态效应分析—以厦门岛为例[J].福州大学学报(自然科学版),2019,47(5):610-616.
- [15]程志峰,何祺胜.基于RSEI的苏锡常城市群生态环境遥感评价[J].遥感技术与应用,2019,34(3):531-539.
- [16]李红星,黄解军,梁友嘉,等.基于遥感生态指数的武汉市生态环境质量评估[J].云南大学学报(自然科学版),2020,42(1):81-90.
- [17]周成,冯学钢,唐睿.区域经济—生态环境—旅游产业耦合协调发展分析与预测—以长江经济带沿线各省市为例[J].经济地理,2016,36(3):186-193.

-
- [18]姜磊, 柏玲, 吴玉鸣. 中国省域经济、资源与环境协调分析—兼论三系统耦合公式及其扩展形式[J]. 自然资源学报, 2017, 32(5): 788-799.
- [19]李茜, 胡昊, 李名升, 等. 中国生态文明综合评价及环境、经济与社会协调发展研究[J]. 资源科学, 2015, 37(7): 1444-1454.
- [20]ARIKEN M, ZHANG F, LIU K, et al. Coupling coordination analysis of urbanization and eco-environment in Yanqi Basin based on multi-source remote sensing data [J]. Ecological Indicators, 2020, 114: 106331.
- [21]KEARNEY S P, COOPS N C, STENHOUSE G B, et al. EcoAnthromes of Alberta: an example of disturbance-informed ecological regionalization using remote sensing [J]. Journal of Environmental Management, 2019, 234: 297-310.
- [22]YANG C, ZHANG C C, LI Q Q, et al. Rapid urbanization and policy variation greatly drive ecological quality evolution in Guangdong-Hong Kong-Macau greater bay area of China: A remote sensing perspective[J]. Ecological Indicators, 2020, 115: 106373.
- [23]张立伟, 张运, 黄晨. 皖江城市带近 20a 生态环境变化遥感指数分析[J]. 长江流域资源与环境. 2018, 27(5): 1061-1070.
- [24]肖长江, 欧名豪, 李鑫. 基于生态经济比较优势视角的建设用地空间优化配置研究—以扬州市为例[J]. 生态学报, 2015, 35(3): 696-708.
- [25]韩博, 金晓斌, 项晓敏, 等. 基于“要素—景观—系统”框架的江苏省长江沿线生态修复格局分析与对策[J]. 自然资源学报. 2020, 35(1): 141-161.
- [26]刘远书, 高文文, 侯坤, 等. 南水北调中线水源区生态环境变化分析研究[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(3): 440-446.
- [27]ZHANG X, LIU L Y, WU C S, et al. Development of a global 30 m impervious surface map using multisource and multitemporal remote sensing datasets with the Google Earth Engine platform [J]. Earth System Science Data, 2020, 12(3): 1625-1648.
- [28]任宇飞, 方创琳, 孙思奥, 等. 城镇化与生态环境近远程耦合关系研究进展[J]. 地理学报, 2020, 75(3): 589-606.
- [29]孙克强, 朱巧玲, 肖平, 等. 推进长江经济带生态环境保护的重点与措施—以江苏为例[J]. 江南论坛, 2020(1): 4-6.