

DOI: 10.20103/j.stxb.202301130085

周寅桥, 李雄. 基于水体型生态指数的无锡市城区生态质量时空变化分析. 生态学报, 2024, 44(4): 1476-1490.

Zhou Y Q, Li X. Spatio-temporal changes of ecological quality in Wuxi urban area based on water-beneficial ecological index. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(4): 1476-1490.

基于水体型生态指数的无锡市城区生态质量时空变化分析

周寅桥, 李 雄*

北京林业大学园林学院, 北京 100083

摘要: 水体是构成生态质量的重要指标, 传统的城市生态质量评价方法通常掩膜了水体区域, 忽略了水对生态质量的影响。基于 Google Earth Engine (GEE) 平台提供的 2013、2015、2017、2019、2021 年的 Landsat8-OLI 影像数据, 利用信息熵权重法耦合水体丰度 (SPWI)、比率植被指数 (RVI)、归一化潜热指数 (NDLI)、干度 (NDSI)、热度 (LST) 构建水体型生态指数 (WBEI), 对江苏省无锡市城区 2013—2021 年生态质量进行时空变化分析, 并利用 Moran 指数计算无锡市城区生态质量的空间自相关性。结果表明: (1) WBEI 融合了水体对生态指数的影响, 弥补了传统方法无法反映水体区域生态质量的不足, 能更好地反映包含水体区域在内的城市生态质量; (2) 2013—2021 年, 无锡市城区平均 WBEI 分别为 0.4808、0.4416、0.5068、0.4471、0.4682, 城区生态质量呈波动变化, 总体呈小幅下降的趋势; (3) 无锡市城区生态质量极好等级的面积减少 67.5251 km², 良好与一般等级增加 76.8633 km², 生态质量等级变好区域的面积大于变差区域的面积, 变好的区域主要分布在东侧锡山区城乡交界处及南侧滨湖区太湖周边地区, 变差的区域主要分布于梁溪区与新吴区; (4) 五个年度的全局莫兰指数分别为 0.6820、0.7002、0.6367、0.7007、0.6886, 生态质量的空间聚类明显, 且以高一高、低—低的聚类类型为主。说明无锡市城区内各区域之间的生态质量差异显著, 同类空间聚集, 主要表现为高质量区域之间相互聚集, 低质量区域之间相互聚集, 生态质量具有高度空间自相关性。本文基于 WBEI 实现水体型城市无锡城区的生态质量的快速检测, 可为同类城市生态保护与环境监测提供方法借鉴与数据支撑。

关键词: 水体型生态指数 (WBEI); 莫兰指数 (Moran 指数); 生态质量; 无锡市城区

Spatio-temporal changes of ecological quality in Wuxi urban area based on water-beneficial ecological index

ZHOU Yinqiao, LI Xiong*

School of Landscape Architecture, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract: Water is an important indicator of ecological quality, but the traditional urban ecological quality evaluation methods often exclude the water body area and ignore the impact of water on ecological quality. This paper is based on Landsat8-OLI image data provided by the Google Earth Engine (GEE) platform in 2013, 2015, 2017, 2019, and 2021. The information entropy weighting method was used to integrate the surface potential water abundance index (SPWI), ratio vegetation index (RVI), normalized difference latent heat index (NDLI), normalized difference soil index (NDSI), and the land-surface temperature (LST) to construct the water-beneficial ecological index (WBEI). The spatiotemporal changes of ecological quality was analyzed based on WBEI in the urban area of Wuxi City, Jiangsu Province from 2013 to 2021. The Moran index was used to calculate the spatial autocorrelation of ecological quality in the urban area of Wuxi City. The results indicated that: (1) The WBEI integrated the impact of water bodies on ecological indices, and compensated for the

基金项目: 国家重点研发计划 (2019YFD1100402)

收稿日期: 2023-01-13; 网络出版日期: 2023-11-27

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lixiong@bjfu.edu.cn

shortcomings of traditional methods that cannot reflect the ecological quality of water bodies, which could better reflect the urban ecological quality including water bodies; (2) From 2013 to 2021, the average WBEI in the urban area of Wuxi City was 0.4808, 0.4416, 0.5068, 0.4471, and 0.4682, showing the fluctuating changes and a slight overall downward trend of the ecological quality; (3) The area of the urban area of Wuxi with excellent ecological quality decreased by 67.5251 km², and the area of good and general ecological quality increased by 76.8633 km². The area of the improved areas of ecological quality grade was larger than the area of the deteriorated areas. The improved areas were mainly distributed at the urban and rural junction of Xishan District in the east and Binhu District around the Taihu Lake in the south, while the deteriorated area is mainly distributed in Liangxi District and Xinwu District; (4) The overall Moran's I of the five years was 0.6820, 0.7002, 0.6367, 0.7007, and 0.6886, respectively. This indicated that there were significant spatial auto-correlation and clustering of ecological quality in the urban area of Wuxi City. The main spatial clustering types of ecological quality were high-high and low-low clustering. The ecological quality differences in different regions within the urban areas of Wuxi City were significant, with similar spatial clusters mainly manifested as mutual aggregation between high ecological quality regions and mutual aggregation between low ecological quality regions. This paper is based on WBEI to achieve rapid detection of ecological quality in Wuxi urban area. It can provide method reference and data support for ecological protection and environmental monitoring in similar cities.

Key Words: Water-beneficial ecological index; Moran index; ecological quality; Wuxi urban area

随着我国沿海发达地区城市化进程的进一步加快,城市脆弱的生态环境与经济快速发展之间的矛盾愈发突出,利用遥感技术对城市生态质量进行监测与评价一直是城市生态方面的热点问题^[1-3]。首先,在评价指数方面,一部分研究采用单一生态因子的评价指数,例如,归一化植被指数、地表温度、叶面积指数、归一化土壤指数、归一化水分指数^[4-8]等,但环境生态质量影响因素众多,单一的生态因子往往难以全面地反映综合的生态质量。因此,更多的研究选择多指标评价指数。2006 年我国环境保护部发布了《生态环境状况评价技术规范》(HJ/T192—2006)^[9],推出了基于生物丰富度指数、植被覆盖度指数、水网密度指数、土地压力指数、污染负荷指数、环境限制指数等多项指标的综合生态环境评价模型——生态环境状况指数(Ecological index, EI),成为我国县以上行政区生态环境年度综合评价的重要标准,被广泛地应用^[10]。EI 指数虽然可以较好地反映研究区的生态环境状况,但也暴露出原始数据获取困难、指标权重受主观要素影响较大、成果无法可视化等问题。为弥补上述不足,徐涵秋等^[11]利用主成分分析法降维集成了湿度、绿度、干度和热度 4 个评价指标,提出遥感生态指数(Remote sensing based ecological index, RSEI),很好地解决了 EI 存在的问题,并利用遥感技术的优势,综合考虑了多种评价指标,对研究区生态质量进行定量的综合评估;其次,多指标评价指数各评价指标权重的确定方法,目前主要包括:专家赋权法、主成分分析法与熵权法等。其中,专家赋权法虽然应用广泛,但容易受主观因素的干扰^[12];主成分分析法虽然避免了主观因素的干扰,但当第一主成分的贡献率不高时,会丢失大量的信息,从而影响最终的评价结果^[13-14]。熵是一种能够反映指标所含信息差异的方法,广泛应用于信息融合^[15]。熵权法是基于熵的融合方法,不仅可以消除主观人为因素的干扰,而且在解释生态指标与生态环境的交互关系方面具有独特的优势^[16]。所以,本文采用熵权法确定各评价指标的权重;最后,在评价对象方面,虽然 RSEI 初期主要是针对城市区域开发的评价指数,但后续的研究将评价对象拓展到了其它区域,并结合评价对象的特点,衍生出许多改进型遥感生态指数。例如,张静等^[17]利用 GEE 平台将气溶胶含量数据纳入 RSEI 模型,研究西安市大气污染对生态质量的影响;YAO 等^[18]将干燥度和盐度纳入指标构建改进型 RSEI 对新疆和田绿洲生态环境质量进行时空分析;Fang 等^[19]通过区域划分从规模角度优化了遥感生态指标;宋美杰等^[20]针对优化主成分分析方法提出 MRSEI 指数;张秦瑞^[21]优化干度指标,提出 IRSEI 指数等,但上述改进型遥感生态指数,在技术上均排除了水体区域对整体环境生态质量的影响,无法适用于多水体研究区域的生态质量评价。水生态因子不仅是动植物生存的基础,可以通过蒸发和蒸腾作用直接影响环境

温湿度等气候因子^[22-24],水体更是生态系统重要的组成部分,因此生态质量评价必须考虑水生态因子的影响。JIAO 等^[25]针对多水型城市,将水体丰度(Surface potential water abundance index, SPWI)、归一化潜热指数(Normalized difference latent heat index, NDLI)等水体因子引入模型,并通过信息熵权重法构建水体型生态指数(Water-beneficial ecological index, WBEI),能较好反映多水型研究区域的生态质量。本文的研究对象无锡市是我国华东沿海重要城市,城区滨临太湖,太湖水面占城区总面积的 23.34%^[26],属于典型的多水型城市,水体对无锡市城区总体生态质量具有极大的影响,需要将水生态因子纳入到评价指数模型。

谷歌地球引擎(Google Earth Engine, GEE)平台具有大量公共资源处理地理空间数据集,特别是在长时间序列的生态质量评价方面具有巨大的应用潜力和优势^[27]。本文选择多水型城市无锡市,基于 GEE 平台构建 WBEI 水体型生态指数模型,利用信息熵权重法研究无锡市城区 2013—2021 年生态质量的时空变化,并通过莫兰指数分析其生态质量空间集聚差异特征,以为多水型城市生态质量评价提供理论依据和方法借鉴。生态质量的动态监测与分析可为无锡生态环境保护与高质量发展提供科学依据。

1 研究对象与方法

1.1 研究区概况

本文选取无锡市城区作为研究对象。总面积 1640km²,下辖包括滨湖区、新吴区、梁溪区、锡山区、惠山区 5 个行政区。地理位置介于 120°10′—120°50′E、31°38′—31°70′N 间,涵盖有 49 个街道/乡镇。其中心城区位于无锡市域南侧,南靠太湖,京杭大运河穿境而过,是一座典型的江南多水型城市。整体地形以平原为主,西侧滨湖区呈散布低山残丘,高程约 326m,南侧主要为太湖水面。城区范围内有京杭大运河、锡澄运河、梁溪河等多条水系。无锡市属北亚热带湿润季风气候区,四季分明,热量充足,降水丰沛,雨热同季^[26](图 1)。

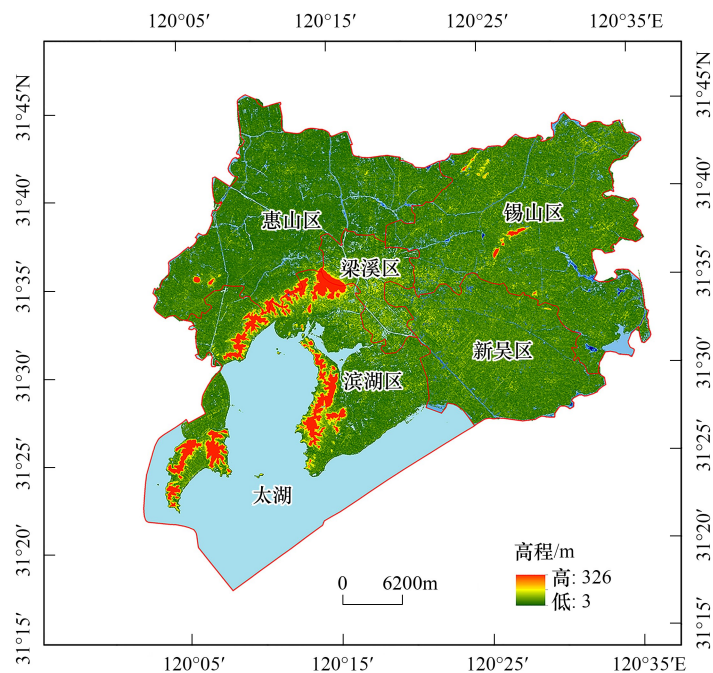


图 1 研究区位置及范围

Fig.1 Location and scope of the study area

1.2 数据来源与预处理

选取无锡市城区 2013 年、2015 年、2017 年、2019 年、2021 年五年份的 30m 空间分辨率 Landsat8_OLI 遥感影像,利用 GEE 平台完成辐射定标、大气校正、几何校正等预处理,为避免季节差异对数据处理结果产生影

响,数据时间范围均为 5—8 月。为充分利用同一季节影像信息,克服云层的影响,首先调用 GEE 自带去云函数对遥感影像进行时间序列重构,最终获得具有晴朗像元的时间序列遥感数据,具体数据见表 1。用地分类数据源自武汉大学 CLCD30m 精度土地利用分类数据^[28]。非遥感数据来源于无锡市史志办公室官方网站(<http://daj.wuxi.gov.cn/ztl/wxnj1/wxnj2021/index.shtml>)和对应年份《无锡年鉴》及各乡镇统计年鉴^[26]。

表 1 数据来源及说明

Table 1 Data sources and description

研究年份 Year	传感器类型 Sensor type	行列号 Ranks	云量 Cloud cover
2013	LANDSAT/LC08/C01/T1_TOA	119/038	4.46
2015	LANDSAT/LC08/C01/T1_TOA	119/038	3.2
2017	LANDSAT/LC08/C01/T1_TOA	119/038	0.46
2019	LANDSAT/LC08/C01/T1_TOA	119/038	0.19
2021	LANDSAT/LC08/C01/T1_TOA	119/038	0.16

1.3 研究方法

1.3.1 生态指标的构建

水体型生态指数(WBEI)集成了与多水型城市生态质量最相关的水体丰度(SPWI)、比率植被指数(Ratio vegetation index, RVI)、归一化潜热指数(NDLI)、干度指数(Normalized difference soil index, NDSI)、热度(Land-surface temperature, LST)五个重要生态指标^[25]。其中,NDLI 描述地表潜热强度。SPWI 和 NDLI 用于描述地表水资源对城市生态质量的影响,RVI 和 NDSI 表征与土地覆盖相关的两个要素,即土地资源和生物资源,LST 用以表示地表热环境。这些指标均可基于遥感数据反演得到,因此结果相对客观可靠、可比性强^[29]。遥感影像的不同波段可以分别反映地表的覆盖特征。其中,B2、B3、B4、B5、B6、B7 分别代表 LANDSAT_8 OLI 蓝色、绿色、红色、近红外波段、短波红外 1 和短波红外 2 波段的波段反射率。根据各波段反演各指标计算方法如下:

(1) 水体丰度(SPWI)

遥感光谱影像的蓝色波段(BLUE)、近红外波段(NIR)和短红外波段 2(SWIR-2)能够有效区分地表目标的含水量差异^[30],因此采用基于上述波段反演生成的水体丰度(SPWI)显示无锡市城区水因子生态质量。具体计算公式如下:

$$SPWI = \frac{(B5 - B7 + B2)}{(B5 + B7 + B2)} \quad (1)$$

(2) 归一化潜热指数(NDLI)

湿度分量与城市内部气候有较明显的相关性,因此,能够有效影响生态质量^[31]。空气湿度可以由地表潜热强度 NDLI 反映^[32]。因此,本文采用 NDLI 表示空气湿度,具体公式如下所示:

$$NDLI = \frac{(B3 - B4)}{(B3 + B4 + B6)} \quad (2)$$

(3) 比率植被指数(RVI)

植被对生态质量影响较大,与场地生态质量具有较强的相关性^[33],目前常见的植被覆盖度主要包括绿度 NDVI、叶面积指数 LAI、比率植被指数 RVI 等^[34],其中,RVI 具有计算简单、效果明显等优点,其对植被地表和建成区裸露地表的区分能力强于目前常用的 NDVI 绿度指数^[35]。因此,本文选用 RVI 表示植被覆盖指数,其计算公式如下:

$$RVI = B5 / B4 \quad (3)$$

(4) 干度指数(NDSI)

建筑与裸土面积同样影响城区环境生态质量,本文采用城市建筑指数(IFI)和城市裸土指数(SI)合成后

的结果代表干度指数(NDSI)^[36],计算公式如下:

$$SI = \frac{(B6 + B4) - (B5 + B2)}{(B6 + B4) + (B5 + B2)} \quad (4)$$

$$IBI = \frac{[(2 \times B6)/(B5 + B6)] - [B5/(B5 + B4)] + [B3/(B3 + B6)]}{[(2 \times B6)/(B5 + B6)] + [B5/(B5 + B4)] + [B3/(B3 + B6)]} \quad (5)$$

$$NDSI = (SI + IBI)/2 \quad (6)$$

(5) 热度(LST)

地表温度对城区的生态质量影响较大^[37]。本文采用大气校正法,具体计算公式如下:

$$LST = \frac{T}{[1 + (\lambda T/\rho) \ln \varepsilon] - 273} \quad (7)$$

$$T = \frac{K_2}{\ln(K_1/L + 1)} \quad (8)$$

式中,LST 为地表温度(℃); T 为传感器处温度值; L 为辐射定标后的热红外波段反射率 $K_1 = 774.89 \text{ W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$, $K_2 = 1321.08 \text{ K}$; λ 为热红外波段中心波长, $\lambda_{\text{TM}} = 11.435 \mu\text{m}$; $\lambda_{\text{b10}} = 10.9 \mu\text{m}$; $\rho = 1.438 \times 10^{-2} \text{ mK}$; ε 为地表比辐射率^[38]。

1.3.2 信息熵权重法

本文采用信息熵权重法(简称熵权法)融合上述五个生态指标生成 WBEI 最终结果。熵权法可根据指标变异性的确定客观权重。一般而言,一个指标因子的信息熵越小,说明其变异性越强,因子能提供的信息越多,故而权重越大^[39-40]。随后根据确定的指标因子权重,从各生态指标组合中获得 WBEI。具体步骤如下:

(1) 指标归一化:对各指标因子进行归一化处理,使其值分布于[0, 1]范围内,具体公式如下:

$$XA = \frac{A - A_{\min}}{A_{\max} - A_{\min}} \quad (9)$$

式中,XA 为指标归一化后的结果,A 为指标值, $A_{\min}$ 为指标最小值, $A_{\max}$ 为指标最大值。

(2) 指标因子信息熵计算:设 E_j 为第 j 个评价指标的熵值,指标因子的信息熵值 E_j 计算公式如下^[41]:

$$E_j = -\ln(n)^{-1} \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln p_{ij} \quad (10)$$

$$p_{ij} = \frac{Y_{ij}}{\sum_{i=1}^n Y_{ij}} \quad (11)$$

式中, E_j 为指标因子信息熵值, p_{ij} 是第 j 个指示符的第 i 个像素的比例, Y_{ij} 是第 i 个指示符像素值的反射率。

$\sum_{i=1}^n Y_{ij}$ 是表示第 j 个指示符的所有像素的反射率之和, n 是表示第 j 个指示剂的像素数。

(3) 确定指标权重:设各指标因子信息熵为 $E_1, E_2, \dots, E_k$,基于信息熵的各指标因子权重计算公式为:

$$W_i = \frac{1 - E_i}{k - \sum E_i} \quad (i = 1, 2, \dots, k) \quad (12)$$

式中, E_i 是第 i 个评估指标的熵值, k 是指标的数量。

(4) 指标线性融合:确定各指标因子的权重后,本文采用线性叠加法融合各指标,得到最终水体生态指数 WBEI 计算结果,具体计算公式如下:

$$WBEI = A_1 \times SPWI + A_2 \times RVI + A_3 \times NDLI - A_4 \times NDSI - A_5 \times LST \quad (13)$$

式中,WBEI 代表经过归一化处理的水体型生态指数最终反演结果;SPWI、RVI、NDLI、NDSI、LST 分别代表 WBEI 中 SPWI 指标因子、RVI 指标因子、NDLI 指标因子、NDSI 指标因子、LST 指标因子的归一化反演结果。 A_1, A_2, A_3, A_4, A_5 分别代表上述各指标因子的权重^[25]。

最后,参考《生态环境评价技术规范》(HJ192—2015)^[9]中的生态质量等级划分标准,将归一化处理后的水体型生态指数 WBEI 划分为极好(0.8—1.0)、良好(0.6—0.8)、一般(0.4—0.6)、较差(0.2—0.4)、极差(0—0.2)五个等级。

1.3.3 空间自相关分析

空间自相关用于测算研究区某一现象与附近同一现象空间相关程度的指标,包括全局空间自相关(Global Moran's I)与局部空间自相关(Local Moran's I),全局莫兰指数计算公式^[42]如下:

$$\text{Global Moran's } I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}) \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (14)$$

式中, W 为空间矩阵; n 为区域单元数, x_i 为第 i 个单元的观测值; $\bar{x}$ 为观测量平均值。本文采用相邻法构建空间权重矩阵,全局莫兰指数期望值计算公式如下:

$$E(\text{Global Moran's } I) = -1/(n-1) \quad (15)$$

式中,若最终计算结果为正数,说明无锡中心城区生态质量在空间聚集性显著,若结果为负数,说明其生态质量空间差异性显著。计算结果绝对值越大,显著性越强。

局部莫兰指数可用于揭示无锡市城区生态质量的局部空间分布特征。本文采用局部莫兰指数 LISA 法进行计算,具体公式如下^[42]:

$$\text{Local Moran's } I = \frac{n(x_i - \bar{x}) \sum_{j=1}^n W_{ij}(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (16)$$

式中,各参数代表意义同前。

2 结果与分析

2.1 WBEI 合理性分析

WBEI 相较传统 RSEI 具有与作为国家生态质量评价标准的生态环境状况指数 EI 更高的拟合度^[25, 43]。同时本文对研究区内 WBEI 计算结果与高分辨率卫星图、RSEI 计算结果进行对比评价,可以得知 WBEI 对比传统生态指数计算方法具有如下优势:

(1)图2中列出了3处典型区作为示例,展示了特殊区域内 WBEI 和 RSEI 在局部细节的差异。其中 A 区域位于滨湖区太湖水域附近,具有植被覆盖度高、水体体量大的特点。通过增加 SPWI 水体丰度指标与 NDLI 归一化潜热指数对水体部分进行反演,与传统 RSEI 水体部分被掩膜,信息空白相比,WBEI 指数可更好体现水体及周边区域的生态质量细节差异。特别是滨水区域植被、水体、建筑、岛屿、桥梁等细节都能反映出来,且差异明显。相较于 RSEI 的计算结果能反映出更多的细节变化。

(2)B 区域位于无锡市锡山区城乡交界处,该区域主要用地类型包括建筑、道路、林地、农田、未利用地等。仔细观察可以看出,WBEI 在不同的用地覆被之间相较传统生态遥感指数 RSEI 具有更明显的可区分性。在 WBEI 计算结果图中,B 区域建筑(红色)、道路(橙色)、未利用地面(黄色)、农田(黄绿色)林地(蓝绿色)与水体(蓝色)各类用地的颜色区分明显,可较完整地显示地表的特征,并更客观的反映生态质量情况。

(3)C 区域位于无锡市区中心居民区部分。可以看出,由于传统的水体掩膜函数 NDWI 难以区分水体和建筑物^[44],导致 RSEI 计算在进行水体掩膜操作时容易同时掩膜水体与部分建筑物,使建筑密集区域的反演结果出现图像数据丢失。形成如图所示的色斑。而 WBEI 画面由于无需掩膜水体,能更好避免上述数据丢失现象的产生。

综上所述,针对传统 RSEI 的改进具有实际价值,由于 WBEI 引入了对水体区域生态质量的计算,拓宽了其适用区域,尤其对多水型城市的适用性上有较大的提升。该结果与 JIAO 等^[25]研究结果一致。

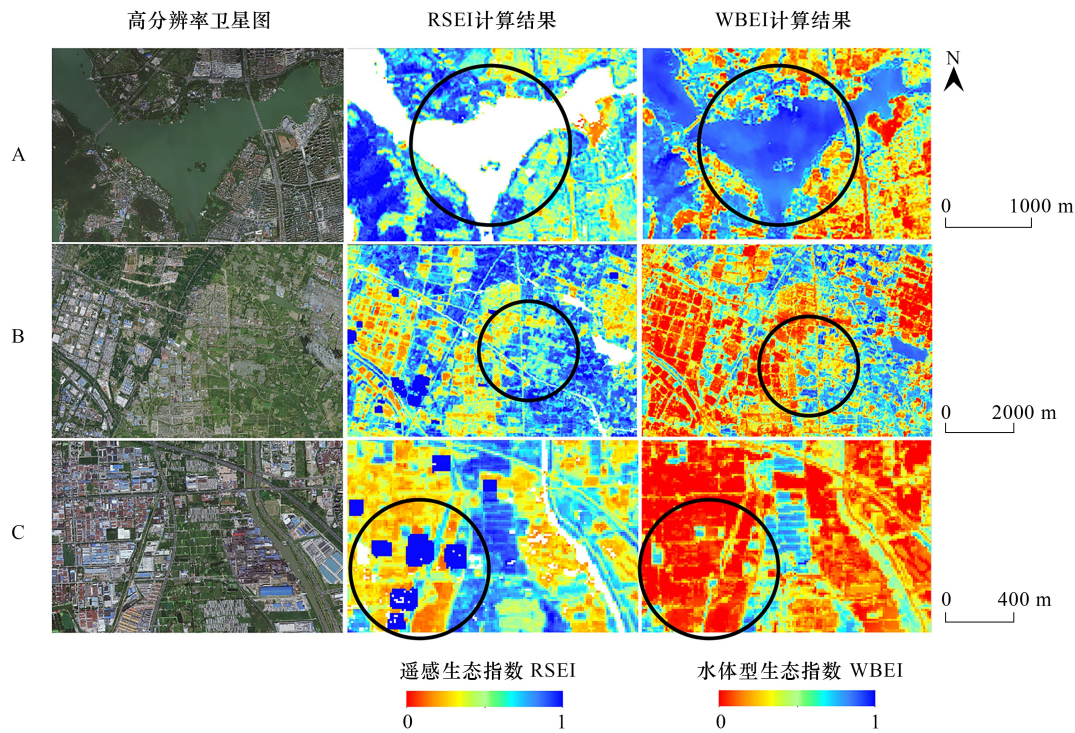


图 2 2021 年无锡市城区 WBEI 与 RSEI 局部细节对比

Fig.2 Comparison of local details between WBEI and RSEI in Wuxi downtown in 2021

RSEI:遥感生态指数 Remote sensing based ecological index; WBEI:水体型生态指数 Water-beneficial ecological index

2.2 无锡市城区生态质量(WBEI)时空格局

根据前述的五级分级法^[9],测算出无锡市城区 2013—2021 年间五个时间段的 WBEI 空间生态等级分布图(图 3),并提取得到各等级的面积及占比(表 2)。

表 2 无锡市城区 2013—2021 年 WBEI 等级面积和比例

Table 2 Area and proportion of WBEI grade in Wuxi urban area from 2013 to 2021

WBEI 等级	极差 Worst (0—0.2)		较差 Poor (0.2—0.4)		中等 Medium (0.4—0.6)		较好 Better (0.6—0.8)		优秀 Best (0.8—1.0)	
	面积 Area/km ²	%	面积 Area/km ²	%	面积 Area/km ²	%	面积 Area/km ²	%	面积 Area/km ²	%
年份 Year										
2013	510.24	31.11	263.53	16.07	194.78	11.88	178.27	10.87	493.18	30.07
2015	508.87	31.03	309.61	18.88	263.41	16.06	192.00	11.71	366.12	22.32
2017	457.83	27.92	260.93	15.91	207.38	12.65	192.70	11.75	521.19	31.78
2019	520.94	31.76	307.53	18.75	243.12	14.82	183.50	11.19	384.87	23.47
2021	503.16	30.68	261.27	15.93	225.34	13.74	224.58	13.69	425.65	25.95

WBEI:水体型生态指数 Water-beneficial ecological index

从时间维度上,由表 2 可知,从 2013 年到 2021 年,无锡市城区 WBEI 等级占比呈两极分化,较差和优秀等级占比相对较高。优秀等级的区域面积比例整体呈先降后升再降的波动变化,优秀区域面积占比下降 4.12%,面积减少 67.53km²;较好等级的面积占比提升 2.82%,面积增加 46.31km²;中等与较差等级所占面积均呈先升后降,再上升再下降的波动变化,面积占比总体稳定在 28%—29%左右。总体来说,2013—2021 年 WBEI 均值分别为 0.4808、0.4416、0.5068、0.4471、0.4682,表明无锡市城区生态质量水平年间存在波动变化,总体上略有下降。分析其原因可能在于影响城市生态质量变化的因素众多,除了植物、水体、土壤、气候等自然因素外,还包括人类工业化生产、生活所产生的环境污染、城镇化率逐年增加等社会经济活动强度对城市生态质量的影响。从整体来看,城市生态质量的变化趋势与城镇化率的增速呈负相关^[45]。无锡市 2013—

2015 年,城市化进程加快,建设用地面积的快速增加同步压缩了蓝绿生态用地空间,可能是导致生态质量下降的主因;2015 年后,受我国“耕地保护政策”的影响,城市化进程减慢,加上受无锡市“生态园林城市”建设的影响,城市生态质量有明显的提升,至 2017 年达到峰值;2017—2021 年,受房地产市场的影响,城市化进程再次加速,间接影响城市生态质量的回落。该研究结果与已有研究^[5-6,10]基本一致。

从空间维度上,从表 3、图 3 可知:无锡市下辖各行政区的生态质量,以滨湖区最优,梁溪区最差。除梁溪

表 3 无锡市城区下辖各行政区 2013—2021 年 WBEI 及排名

Table 3 WBEI and ranking of administrative regions of Wuxi city from 2013 to 2021

行政区 District	2021 WBEI	排名 Ranking	2019 WBEI	排名 Ranking	2017 WBEI	排名 Ranking	2015 WBEI	排名 Ranking	2013 WBEI	排名 Ranking
锡山区	0.3792	2	0.3574	2	0.4205	2	0.3406	2	0.4240	2
新吴区	0.2968	3	0.3184	3	0.3332	4	0.2556	4	0.2871	4
梁溪区	0.2035	5	0.2185	5	0.1887	5	0.1950	5	0.1586	5
惠山区	0.2908	4	0.2588	4	0.3756	3	0.3131	3	0.3255	3
滨湖区	0.7015	1	0.6666	1	0.7216	1	0.6599	1	0.6961	1

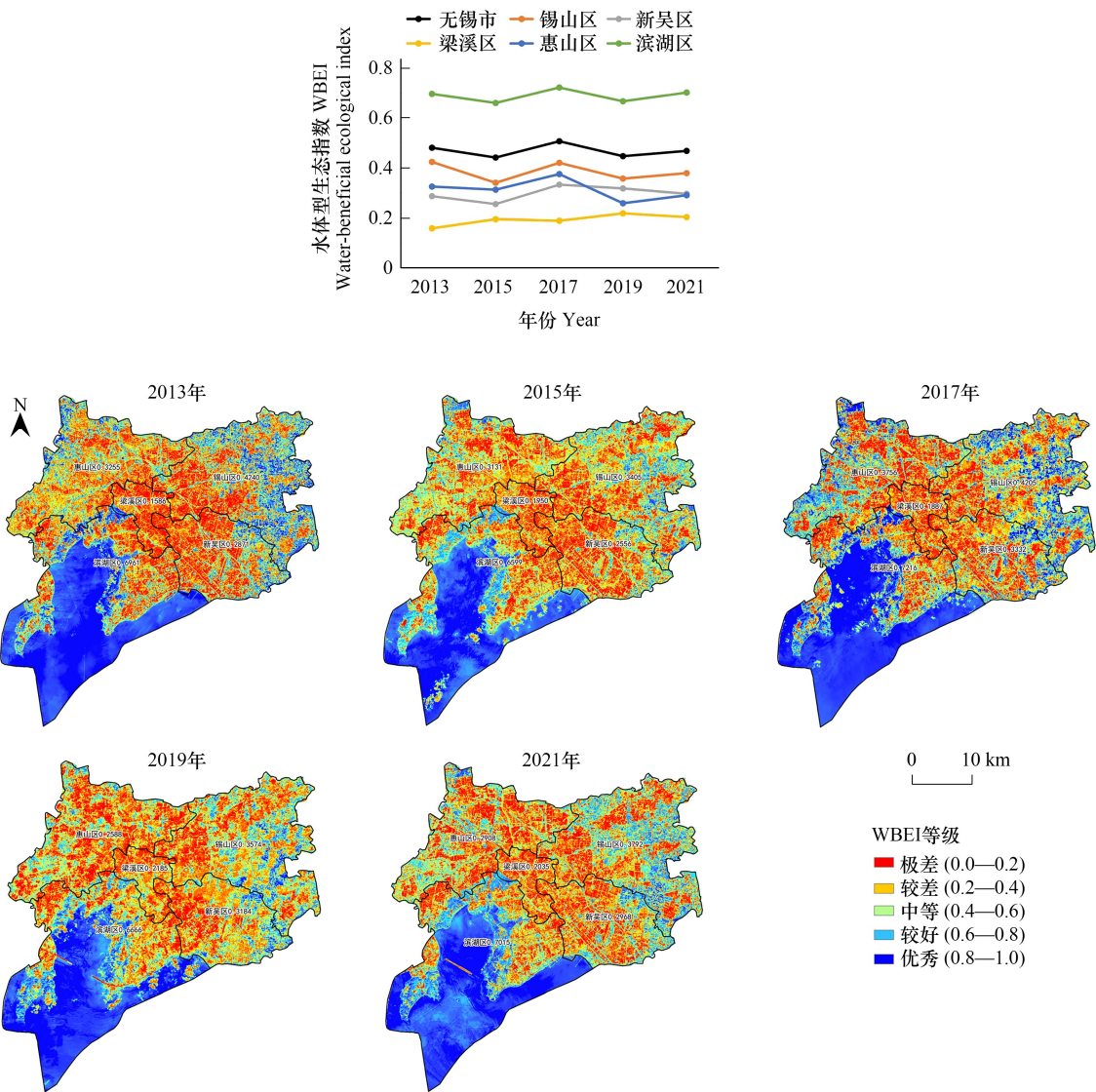


图 3 无锡市城区 2013—2021 年 WBEI 空间格局及变化趋势图

Fig.3 WBEI Spatial Pattern and Change Trends in Wuxi City from 2013 to 2021

区外,无锡市及各行政区 WBEI 值变化趋势基本一致。总体生态质量以城市周边区域相对较高,尤其是滨湖区西侧滨临太湖的区域与锡山区东侧城乡结合部 WBEI 等级最高。分析其原因可能是因为滨湖区大部分区域紧邻太湖,滨湖有大量的公园、林地,有利于提升了区域整体生态质量;锡山区的东侧以农田为主,拉升了区域的生态质量总体水平。以梁溪区为中心的城市建设密集区,总体 WBEI 值偏低,反映该片区生态质量较低。因梁溪区是无锡市的老城区,建筑密度大,主要用地类型以建设用地、不透水地面为主,总体生态质量低于其它生态用地占比较大的区域。总体上来说,反演计算结果与现实情况相符。也进一步验证了 WBEI 在无锡市这类水体型城市应用的适用性。

2.3 无锡市城区生态质量(WBEI)时空演变趋势

本文采用 ARCGIS10.6 波段计算器工具对 2013、2015、2017、2019、2021 年无锡市 WBEI 分布图进行差值计算,得到 2013—2015 年、2015—2017 年、2017—2019 年以及 2019—2021 年间无锡城区 WBEI 等级变化图(图 4)。为进一步分析无锡市城区 2013—2021 年间 WBEI 时空演变趋势,将变化分为 7 个等级,分别为:明显变差(1 级)、变差(2 级)、稍变差(3 级)、不变(4 级)、稍变好(5 级)、变好(6 级)和明显变好(7 级)。

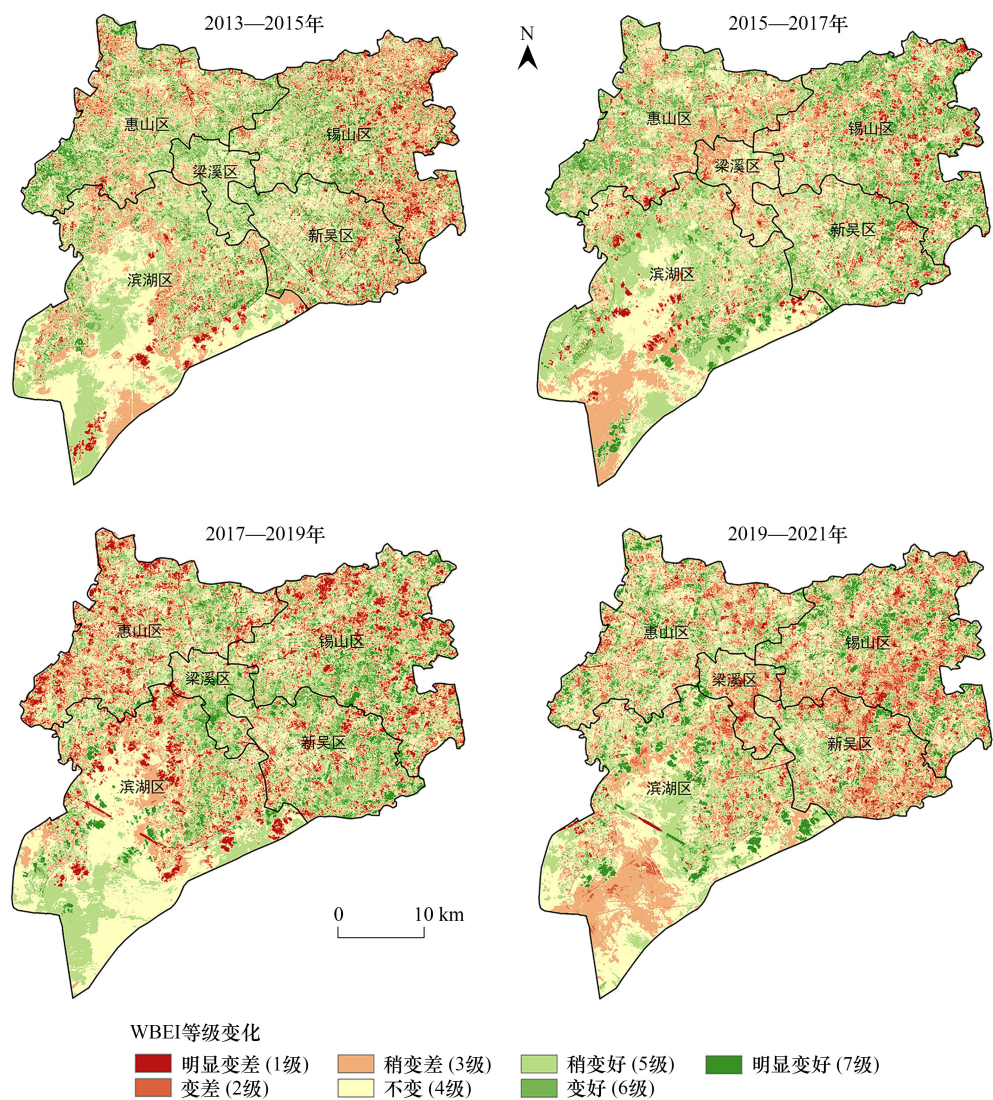


图 4 无锡市城区 WBEI 时空变化图

Fig.4 Spatial and temporal changes of WBEI in Wuxi urban area

时间维度上,由表 4 可知,2013—2021 年间,无锡市城区 WBEI 保持不变的区域占比由 35%变为 34%,几年间整体保持稳定;变好的区域由 36%下降为 30%,变好区域面积下降了 82.995km²;变差的区域由 29%提升到 36%,下降区域的面积增加了 110.945km²;其中,2015—2017 年间,WBEI 增幅最大,提升面积达 694.289km²。此后,2017—2021 年间,无锡市城区生态质量水平变化情况逐步稳定,生态质量提升、下降、不变区域所占面积比例均维持在 33%左右。

从空间维度,由表 4、图 4 可知,无锡市城区生态质量虽总体保持稳定,但局部变化明显。空间上,生态质量提升区域主要分布于北侧惠山区、南侧滨湖区和东侧新吴区。锡山区和梁溪区生态质量总体呈下降趋势,场地总体生态质量变好和变差面积的比例较接近。2013—2017 年,WBEI 变化区域相对集中,梁溪区等城市中心片区生态质量先升后降,锡山区、新吴区等周边区域则先降后升。2017—2021 年,WBEI 变化区域相对分散,惠山区、滨湖区先降后升,梁溪区、锡山区与新吴区总体先升后降。不同区域的生态质量呈现起伏波动。

表 4 无锡市城区 2013—2021 年 WBEI 等级变化的面积

Table 4 Area of WBEI Grade Change in Wuxi Central Urban Area from 2013 to 2021

类别 Class	级数 Grade	2013—2015			2015—2017			2017—2019			2019—2021		
		级面积/ km ²	类面积/ km ²	百分比/%	级面积/ km ²	类面积/ km ²	百分比/%	级面积/ km ²	类面积/ km ²	百分比/%	级面积/ km ²	类面积/ km ²	百分比/%
变差 Degradation	1	46.91	475.17	29	36.04	403.61	25	81.24	518.48	32	38.56	586.11	36
	2	114.19			93.78			149.81			153.16		
	3	314.07			273.79			287.43			394.40		
不变 No change	4	582.09	582.09	35	542.12	542.12	33	546.95	546.95	33	554.13	554.13	34
变好 Improvement	5	380.34	582.77	36	450.50	694.29	42	354.83	574.59	35	297.80	499.77	30
	6	155.16			198.62			165.24			133.64		
	7	47.26			45.17			54.52			68.33		

等级:1:明显变差;2:变差;3:稍变差;4:不变;5:稍变好;6:变好;7:明显变好

2.4 无锡市城区 WBEI 建模与预测

本文采用 500m×500m 格网进行取样,共收集 3500 个样本数据,并利用 SPSS 软件的逐步回归分析,建立以水体型生态指数 WBEI 为因变量,NDLI、NDSI、LST、SPWI、RVI 五个相关生态指标为自变量的 2013—2021 各主要年份回归模型,具体结果如下:

$$WBEI_{2013} = 0.265 - 0.208LST_{2013} + 0.497NDLI_{2013} - 0.229NDSI_{2013} + 0.243RVI_{2013} + 0.339SPWI_{2013} \quad (R^2 = 0.9996) \quad (17)$$

$$WBEI_{2015} = 0.234 - 0.163LST_{2015} + 0.435NDLI_{2015} - 0.204NDSI_{2015} + 0.197RVI_{2015} + 0.376SPWI_{2015} \quad (R^2 = 0.9996) \quad (18)$$

$$WBEI_{2017} = 0.282 - 0.247LST_{2017} + 0.403NDLI_{2017} - 0.203NDSI_{2017} + 0.285RVI_{2017} + 0.350SPWI_{2017} \quad (R^2 = 0.9994) \quad (19)$$

$$WBEI_{2019} = 0.265 - 0.229LST_{2019} + 0.409NDLI_{2019} - 0.223NDSI_{2019} + 0.244RVI_{2019} + 0.410SPWI_{2019} \quad (R^2 = 0.9995) \quad (20)$$

$$WBEI_{2021} = 0.299 - 0.210LST_{2021} + 0.424NDLI_{2021} - 0.215NDSI_{2021} + 0.267RVI_{2021} + 0.328SPWI_{2021} \quad (R^2 = 0.9972) \quad (21)$$

由表 5 可知,五个相关生态指标在 5 个年份的回归模型中均被保留下来,说明所选五个指标都是无锡市城区生态质量的关键指标。同时,各回归模型的 R^2 均大于 0.99,说明模型具有较强的拟合度。通过进一步对所收集样本数据进行可视化分析,形成 WBEI 生态指数与五个相关生态指标(NDLI、NDSI、LST、SPWI、RVI)的二维散点图(图 5)。可以看出 NDLI、SPWI 和 RVI 是正向指标,NDSI 和 LST 是负向指标。从各指标对 WBEI 的贡献率系数来看,与水体和湿度相关的 SPWI 水体丰度和 NDLI 归一化潜热指数具有最高的贡献率,说明对于水体型城市而言,水体生态质量是城市总体生态质量的重要组成部分,NDSI 和 RVI 具有较高的贡献率,说明植被覆盖度对生态质量具有较大的正面影响,而与城市化水平相关的 NDSI 作为生态质量的主要干扰因素,说明城市化进展加快,建设用地增加对生态质量具有严重的负面影响效果。代表热度的 LST 贡献率相对较弱,说明比起水体、植被和城市化率的影响,气候因素对无锡市城区生态质量的影响相对较弱。

表 5 2013—2021WBEI 回归模型系数比较

Table 5 Comparison of WBEI regression model coefficients from 2013 to 2021

年份 Year	常数 Constant	地表温度 LST	归一化潜热 指数 NDLI	干度指数 NDSI	比率植被 指数 RVI	水体丰度 SPWI	拟合优度 R^2
2013	0.265	-0.208	0.497	-0.229	0.243	0.339	0.9996
2015	0.234	-0.163	0.435	-0.204	0.197	0.376	0.9996
2017	0.282	-0.247	0.403	-0.203	0.285	0.350	0.9994
2019	0.265	-0.229	0.409	-0.223	0.244	0.410	0.9995
2021	0.299	-0.210	0.424	-0.215	0.267	0.328	0.9972
均值 Mean	0.269	-0.211	0.434	-0.215	0.247	0.361	0.999

LST;地表温度 Land surface temperature;NDLI;归一化潜热指数 Normalized difference latent heat index;NDSI;干度指数 Normalized difference soil index;RVI;比率植被指数 Ratio vegetation index;SPWI;水体丰度 Surface potential water abundance index

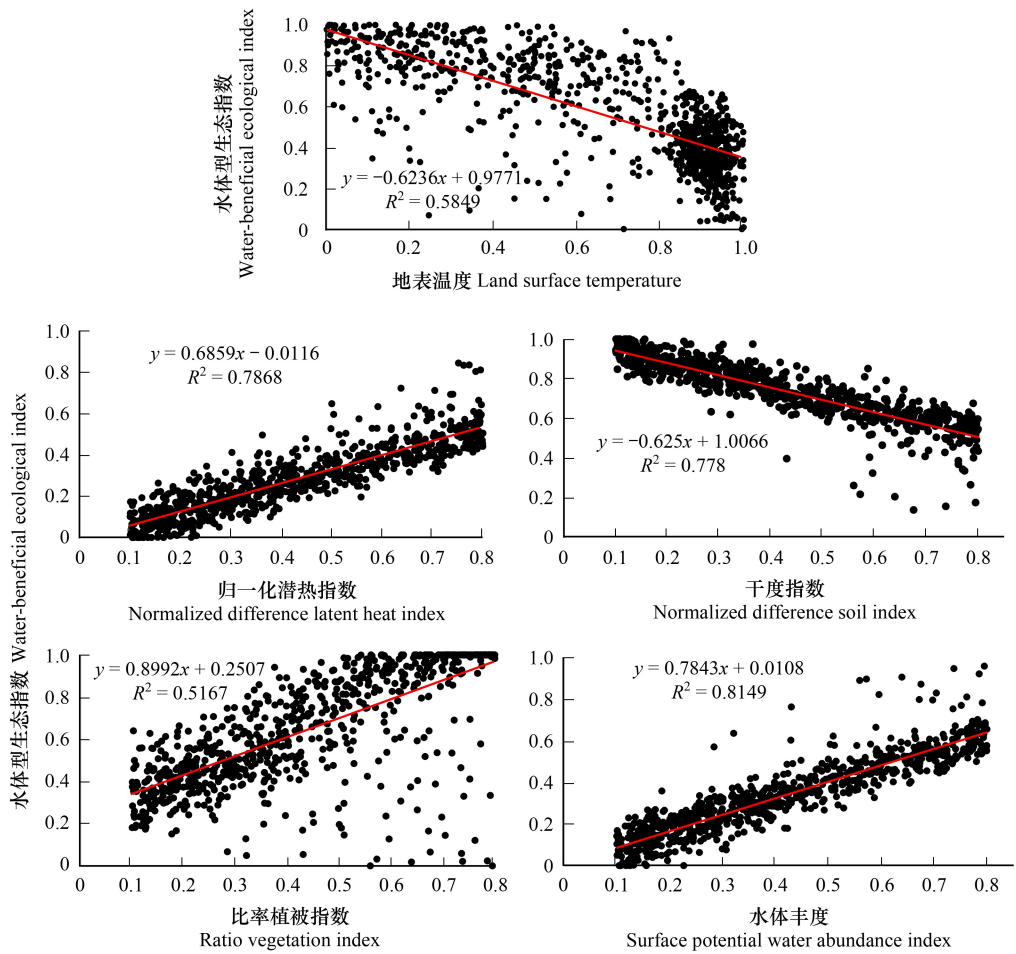


图 5 WBEI 与各指标二维散点图

Fig.5 Two dimensional Scatter Chart of WBEI and Indicators

2.5 无锡市城区生态质量空间自相关分析

为了进一步分析无锡市生态质量空间布局特征,利用 ArcGIS 软件的空间自相关模块,对无锡市城区 2013、2015、2017、2019、2021 年生态质量的空间分布进行计算,得出其全局莫兰指数分别为 0.6820、0.7000、0.6367、0.7007、0.6886, P 值均小于 0.05,说明无锡市城区生态质量空间分布具有较强正相关性,呈聚集性而非随机性。总体空间正相关性呈先上升后下降,再上升再下降的波动性趋势,以 2013 年空间正相关性最弱,为 0.6820;2019 年空间正相关性最强,达到 0.7007。说明无锡市城区生态质量与用地空间的性质相关,且聚

集性显著,生态质量高低等级的区域划分明显。分析其原因可能与研究区建设用地开发水平相关,2013 年,研究区尚有大量建设用地尚未开发,各类用地混杂,用地空间相关性弱;随着开发建设的深入,各类用地生态质量分区加强,空间相关性至 2019 年达到峰值;2019 年以后,可能受“生态园林城市”建设的影响,建设用地区内一批城市公园和道路绿地的建成,增加不透水地面内绿地的生态影响,相对减弱了各类空间的相关性。

利用局部莫兰指数进一步分析,得到 WBEI 的 5 种聚散类型,即不显著、高-高(H-H)、低-低(L-L)、高-低(H-L)和低-高(L-H)。由图 6 可知,无锡市城区空间自相关特征以高-高聚类(H-H)和低-低聚类(L-L)为主,空间分布联系紧密。其中,南侧滨湖区太湖区域以正相关性较强的 H-H 聚类为主,说明生态质量较高区域主要集中在该区;中部城市建设用地主要为 L-L 聚类,说明该区是生态质量较低图斑的主要聚集区;周边城乡交界处范围主要表现为不显著,说明生态质量高低交融,分区不明显。总体而言,无锡市城区生态质量以 H-H 聚类和 L-L 聚类分布较集中且所占面积大,H-L 聚类和 L-H 聚类分布少且松散。说明无锡市城区各研究年份空间聚类显著,生态质量等级分区明显,且以 H-H 聚类和 L-L 聚类为主,原因同前。

3 讨论

水体是城市生态质量的重要组成部分,也与生态安全息息相关。本文基于 GEE 平台,引入水体相关生态指标,通过信息熵权重法构建水体型生态指数 WBEI,对无锡市城区 2013—2021 年生态质量时空变化展开分析。前人研究表明^[25],WBEI 弥补了传统的遥感生态指数 RSEI 无法评价水体的不足,适用于水体型城市生态质量的遥感检测与评价。本文进一步证实其有效性与优越性。

(1) WBEI 及其指标的有效性

在主要控制指标方面,各种改进型遥感生态指数多是在 RSEI 的基础上,根据自己研究区的特点,适当增减主控指标。增加的指标多以大气、土壤、气候等自然生态指标为主。然而,大部分改进型遥感生态指数与 RSEI 一样,并不适用于水体区域^[10-14]。当研究区域有大面积水体时,需要对水体区域进行掩膜,忽略水体信息,这对于一些多水型城市的研究并不适用。本文为了满足多水型城市的生态质量检测,运用的 WBEI 指数,在传统生态遥感指数 RSEI 的基础上增加水体丰度(SPWI)、归一化潜热指数(NDLI)等水体因子。对无锡市 3 块不同特征的样地进行实证研究,结果显示,WBEI 能够兼顾陆地与水体区域,能区分更多的地表信息,且与研究区的实际状况一致性更高,整体效果优于 RSEI。该结果与 JIAO 等运用 WBEI 分析了青岛西海岸经济新区、海淀区、胶州市和崂山区四个试验区生态质量的研究结果一致^[25]。证明了 WBEI 在多水型城市生态质量测算中应用的有效性与可行性。

(2) WBEI 与五个相关生态指标(NDLI、NDSI、LST、SPWI、RVI)的多元回归关系可以看出,无锡市城市生态质量主要驱动因子与城市的温度、湿度等气候因子和土地利用因子密切相关。其中,水体丰度(SPWI)、植被覆盖率(RVI)代表的是蓝绿生态用地指标,NDSI 代表的是城市建筑与不透水用地指标,反映的是城市开发的强度。无锡是长江三角洲地区沿海发达中心城市之一,近 10 年来城市化发展迅猛。由图 5 可知,自 2013 至 2021 年来,无锡市城区 H-H 聚类面积变化不明显,L-L 聚类所占面积呈逐步下降趋势,说明梁溪区等生态质量较差区域的生态质量在逐步变好。空间上 H-H 聚类和 L-L 聚类分布集中且所占面积大,可能是因为无锡市城市中心区发展已趋于饱和,生态质量也就趋于稳定,变化较小。滨湖区因紧邻太湖,滨湖公园、绿地等高生态质量用地相对较多,所以一直是生态质量最好的区域。近十年无锡城市生态质量起伏相对较大的区域是城市周边城乡结合部,这可能与城市化建设进程,改变土地利用结构有关。这结果与刘佳玥等(2023)^[46]的研究结果一致。

(3) 研究存在的不足:城市生态质量的影响因子众多,既有与植物生长密切相关的温度、湿度等生态气候因素,也有人类生产生活所产生的抑制因素^[47]。总体而言,城市化进程通常会对生态质量产生负面影响,但在城市化过程中实施积极管理,控制不透水地面及建筑增长速度,加强对水体、绿地等生态友好型用地的保护建设,能有效减缓城市生态质量下降。本文分析了无锡市近 10 年来城市生态质量的时空变化,结果可为深入

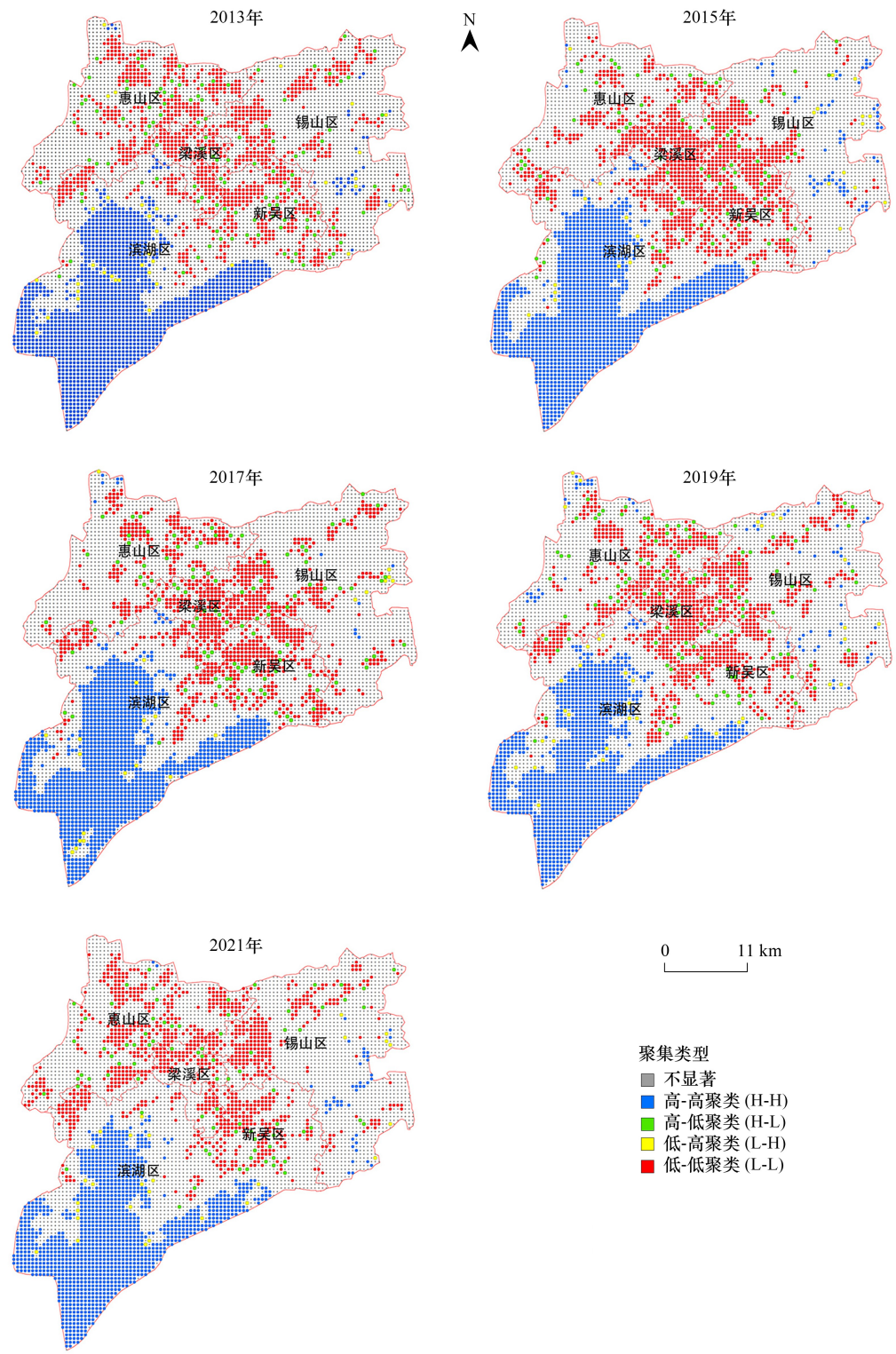


图6 无锡市城区 2013—2021 年 LISA 聚类图

Fig.6 LISA cluster diagram of Wuxi downtown from 2013 to 2021

研究多水型城市生态质量监测提供方法借鉴,为城市建设与生态环境保护协调发展提供理论依据。但未能进一步针对导致生态质量变化的主要影响因子展开研究是本文的不足。未来研究的重点可结合研究区土地利用变化、人口迁移、经济活动等数据,更加全面深入地研究人类活动因素对生态质量的影响。

4 结论

(1) 本文基于 GEE 平台,将 SPWI 水体丰度、NDLI 归一化潜热指数等水体因子纳入计算,利用信息熵权重法构建水体型生态指数 WBEI,适用于多水型城市的生态质量监测。其具有能够计算水体生态质量、图像区分性强、数据丢失少等优点。有助于全面客观监测、评价研究区生态质量。

(2) 从时间维度,2013—2021 年无锡市城区 WBEI 指数分别为 0.4808、0.4416、0.5068、0.4471、0.4682,呈先升后降、再升再降的波动趋势,各年份指数变化幅度较小,总体生态质量趋于小幅下降。2013—2015、2015—2017、2017—2019 和 2019—2021 四个时间段生态质量改善比例分别为 36%、42%、35%、30%;生态质量退化比例分别为 29%、25%、32%、36%。其中,2017 年生态质量提升最为明显。

(3) 从空间维度上,无锡市滨湖区生态质量一直最优,其次是锡山区等城市周边城乡结合部,以梁溪区为中心的城市中心区总体生态质量较差,但局部有起伏。生态质量相对较好的区域主要位于南侧滨湖山区、公园绿地区域及东侧和西侧的城乡接合部农田区域。生态质量表现为较差、不足的区域主要位于不透水建筑部分。生态空间格局总体分布由集中到分散转变。

(4) 2013—2021 年 5 期莫兰指数分别为 0.6820、0.7000、0.6367、0.7007、0.6886,说明研究区生态质量呈较强的空间正相关性。空间分布以 H-H 聚类和 L-L 聚类为主,且较集中。L-H 聚类和 H-L 聚类分布较分散,且面积较少。说明无锡市城区生态质量空间聚类显著,生态质量高低等级的分区明显,且以高等级和低等级的聚集区为主。

参考文献 (References):

- [1] 赵其国,黄国勤,马艳芹. 中国生态环境状况与生态文明建设. 生态学报, 2016, 36(19): 6328-6335.
- [2] Zhu M C, Shen L Y, Tam V W Y, Liu Z, Shu T H, Luo W Z. A load-carrier perspective examination on the change of ecological environment carrying capacity during urbanization process in China. The Science of the Total Environment, 2020, 714: 136843.
- [3] Ahmed Z, Asghar M M, Malik M N, Nawaz K. Moving towards a sustainable environment: the dynamic linkage between natural resources, human capital, urbanization, economic growth, and ecological footprint in China. Resources Policy, 2020, 67: 101677.
- [4] Stefanov W L, Netzbald M. Assessment of ASTER land cover and MODIS NDVI data at multiple scales for ecological characterization of an arid urban center. Remote Sensing of Environment, 2005, 99 (1/2): 31-43.
- [5] Chen X L, Xu Y, Yang J X, Wu Z F, Zhu H. Remote sensing of urban thermal environments within local climate zones: a case study of two high-density subtropical Chinese cities. Urban Climate, 2020, 31: 100568.
- [6] Li A H, Bo Y C, Chen L. Bayesian Maximum Entropy data fusion of field observed LAI and Landsat ETM derived LAI. 2011 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. July 24-29, 2011, Vancouver, BC, Canada. IEEE, 2011: 2617-2620.
- [7] Vibhute A D, Dharmal R, Nagne A, Surase R, Varpe A, Gaikwad S, Kale K V, Mehrotra S C. Evaluation of soil conditions using spectral indices from hyperspectral datasets. 2017 2nd International Conference on Man and Machine Interfacing (MAMI). December 21-23, 2017, Bhubaneswar, India. IEEE, 2018: 1-6.
- [8] Eid A N M, Olatubara C O, Ewemoje T A, El-Hennawy M T, Farouk H. Inland wetland time-series digital change detection based on SAVI and NDWI indices; Wadi El-Rayan Lakes, Egypt. Remote Sensing Applications: Society and Environment, 2020, 19: 100347.
- [9] 中华人民共和国环境保护部. 生态环境状况评价技术规范 (HJ192-2015). 中国环境科学出版社, 2015, 5.
- [10] 王瑶, 宫辉力, 李小娟. 基于 GIS 的北京市生态环境质量监测与分析. 国土资源遥感, 2008, 20(1): 91-96.
- [11] 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.
- [12] Wang S D, Zhang X Y, Wu T X, Yang Y Y. The evolution of landscape ecological security in Beijing under the influence of different policies in recent decades. Science of the Total Environment, 2019, 646: 49-57.
- [13] Sun X, Tan X Y, Chen K L, Song S, Zhu X D, Hou D L. Quantifying landscape-metrics impacts on urban green-spaces and water-bodies cooling effect: the study of Nanjing, China. Urban Forestry & Urban Greening, 2020, 55: 126838.
- [14] Folch-Fortuny A, Arteaga F, Ferrer A. PCA model building with missing data: new proposals and a comparative study. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 2015, 146: 77-88.
- [15] Sholehkardar A, Tavakoli J, Liu Z. Theoretical analysis of Tsallis entropy-based quality measure for weighted averaging image fusion. Information Fusion, 2020, 58: 69-81.
- [16] Wang Y H, Liu Y M. Bayesian entropy network for fusion of different types of information. Reliability Engineering & System Safety, 2020, 195: 106747.
- [17] 张静, 杨丽萍, 贡恩军, 王宇, 任杰, 刘曼. 基于谷歌地球引擎和改进型遥感生态指数的西安市生态环境质量动态监测. 生态学报,

- 2023, 43(5): 2114-2127.
- [18] 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.
- [19] Jiang F, Zhang Y Q, Li J Y, Sun Z Y. Research on remote sensing ecological environmental assessment method optimized by regional scale. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28(48): 68174-68187.
- [20] 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. *干旱区研究*, 2019, 36(6): 1521-1527.
- [21] 张秦瑞, 赵良军, 林国军, 万虹麟. 改进遥感生态指数的宜宾市三江汇合区生态环境评价. *自然资源遥感*, 2022, 34(1): 230-237.
- [22] Ling H B, Guo B, Yan J J, Deng X Y, Xu H L, Zhang G P. Enhancing the positive effects of ecological water conservancy engineering on desert riparian forest growth in an arid basin. *Ecological Indicators*, 2020, 118: 106797.
- [23] 朱菲, 苏涛, 王建, 夏俊, 廖晋一. 基于地表参数变化的南京市热岛效应时空演变特征分析. *遥感信息*, 2022, 37(4): 106-113.
- [24] Huang F, Ochoa C G, Chen X, Cheng Q B, Zhang D R. An entropy-based investigation into the impact of ecological water diversion on land cover complexity of restored oasis in arid inland river basins. *Ecological Engineering*, 2020, 151: 105865.
- [25] 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.
- [26] 无锡市史志办公室. 无锡年鉴. <http://daj.wuxi.gov.cn/ztl/wxnj1/wxnj2021/index.shtml>. [2022-12-23]
- [27] 何天星, 田宁, 周锐, 马群, 张洁, 高峻. 基于 GEE 和 RSEI 的长三角一体化示范区生态环境质量动态评估. *生态学杂志*, 2023, 42(2): 436-444.
- [28] Yang J, Huang X. The 30m annual land cover data set and its dynamics in China from 1990 to 2019. *Earth System Science Data*, 2021, 13(8): 3907-3925.
- [29] Cheng B, Li H E, Yue S Y, Huang K. A conceptual decision-making for the ecological base flow of rivers considering the economic value of ecosystem services of rivers in water shortage area of Northwest China. *Journal of Hydrology*, 2019, 578: 124126.
- [30] Rong Q Q, Cai Y P, Su M R, Yue W C, Dang Z, Yang Z F. Identification of the optimal agricultural structure and population size in a reservoir watershed based on the water ecological carrying capacity under uncertainty. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 234: 340-352.
- [31] Yang X S, Peng L L H, Chen Y, Yao L Y, Wang Q Q. Air humidity characteristics of local climate zones: a three-year observational study in Nanjing. *Building and Environment*, 2020, 171: 106661.
- [32] Liou Y A, Le M S, Chien H. Normalized difference latent heat index for remote sensing of land surface energy fluxes. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019, 57(3): 1423-1433.
- [33] 惠嘉伟, 白中科, 刘凯杰, 王子昊. 归一化植被指数(NDVI)在草原露天煤矿区的适用性分析. *工程科学学报*, 2023, 45(1): 54-63.
- [34] Xie Y W, Zhao X J, Li L L, Wang H Y. Calculating NDVI for Landsat7-ETM data after atmospheric correction using 6S model: a case study in Zhangye city, China. 2010 18th International Conference on Geoinformatics. June 18-20, 2010, Beijing, China. IEEE, 2010: 1-4.
- [35] Adeyeri O E, Akinsanola A A, Ishola K A. Investigating surface urban heat island characteristics over Abuja, *Nigeria*: relationship between land surface temperature and multiple vegetation indices. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 2017, 7: 57-68.
- [36] Liao W H, Jiang W G, Huang Z Q. Spatiotemporal variations of eco-environment in the Guangxi Beibu Gulf Economic Zone based on remote sensing ecological index and granular computing. *Journal of Geographical Sciences*, 2022, 32(9): 1813-1830.
- [37] 刘尚钦, 张福浩, 赵习枝, 黄靖, 高鹏程. 干旱区绿洲遥感生态指数的改进. *测绘科学*, 2022, 47(6): 143-151, 203.
- [38] 周玲美, 王世航. 内蒙古杭锦旗生态环境时空变化的遥感监测与评价. *应用生态学报*, 2020, 31(6): 1999-2006.
- [39] Sreeparvathy V, Srinivas V V. A fuzzy entropy approach for design of hydrometric monitoring networks. *Journal of Hydrology*, 2020, 586: 124797.
- [40] Li X F. TOPSIS model with entropy weight for eco geological environmental carrying capacity assessment. *Microprocessors and Microsystems*, 2021, 82: 103805.
- [41] Gao P C, Wang X Y, Wang H Y, Cheng C X. Viewpoint: A correction to the entropy weight coefficient method by Shen et al. for accessing urban sustainability, 2020, 103: 102742.
- [42] 杨保华, 杨清华, 陈剑虹. 关于《生态环境状况评价技术规范(试行)》中土地退化指数的权重及计算方法的探讨. *生态与农村环境学报*, 2011, 27(3): 103-107.
- [43] 陈培阳, 朱喜钢. 基于不同尺度的中国区域经济差异. *地理学报*, 2012, 67(8): 1085-1097.
- [44] 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.
- [45] 孔玲玲, 冯险峰, 武爽, 刘子川, 姚玄楚. 拉萨城市圈 1994—2017 年生态质量的时空动态监测及驱动力分析. *地理科学进展*, 2022, 41(3): 437-450.
- [46] 刘佳玥, 姜翠玲, 耿慧. 2010—2020 年太湖无锡水域水质时空变化及原因分析. *水电能源科学*, 2023, 41(7): 49-53.
- [47] 杨山, 汤君友. 无锡市空间扩展的生态环境质量综合评价研究. *中国人口·资源与环境*, 2003, 13(1): 65-69.