

文章编号: 1672-8785(2025)06-0042-07

基于卫星遥感的长江三角洲城市群 生态气候演变研究

史 军¹ 崔林丽¹ 张 敏² 沈钟平¹ 杨何群¹

(1. 上海市生态气象和卫星遥感中心, 上海 200030;

2. 江苏省气象服务中心, 江苏 南京 210008)

摘 要: 为了解长三角城市群生态气候特征及动态变化, 基于区域 111 个气象站点逐日气温、降水量、相对湿度、风速等观测数据以及 MODIS 归一化差值植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)和地表温度(Land Surface Temperature, LST)数据, 采用遥感、GIS 和主成分分析(Principal Component Analysis, PCA)法, 并对现有的遥感生态指数(Remote Sensing Ecological Index, RSEI)进行改进。从干湿度、舒适度、绿度、热度、空气洁净度等方面构建了综合生态气候指数模型, 分析了城市群生态气候的动态变化特征。结果表明, 2001~2018 年期间, 城市群植被覆盖度以 2.80%/10a 的趋势显著增加, 混合层高度以 51.3 m/10a 显著降低, 综合生态气候指数以 0.10/10a 显著降低, 并呈现出区域性整体降低的趋势。人类活动和城市化对长三角城市群生态气候变化具有显著的影响, 需要在推动经济社会发展的同时加强生态气候的保护和改善, 实现人与自然和谐共生。

关键词: 生态气候; 动态变化; MODIS; 长三角城市群

中图分类号: P467; X821 **文献标志码:** A

DOI: 11.3969/j.issn.1672-8785.2025.06.006

Study on Eco-Climate Evolution of the Yangtze River Delta Urban Agglomeration Based on Satellite Remote Sensing

SHI Jun¹, CUI Lin-li¹, ZHANG Min², SHEN Zhong-ping¹, YANG He-qun¹

(1. Shanghai Ecological Forecasting and Remote Sensing Center, Shanghai 200030, China;

2. Jiangsu Meteorological Service Center, Nanjing 210008, China)

Abstract: In order to understand the characteristics and dynamic changes of the eco-climate in the Yangtze River Delta (YRD) urban agglomeration, based on the daily observation data of air temperature, precipitation,

收稿日期: 2024-11-25

基金项目: 国家重点研发计划重点专项子课题(2023YFC3805304-1); 中国气象局气候变化专题项目(QBZ202412); 风云卫星先行计划项目(FY-APP-2024.0201; FY-APP-2021.0407)

作者简介: 史军(1975-), 男, 研究员, 博士, 主要从事气候变化与生态气候研究。

E-mail: sunrainlucky@qq.com

relative humidity and wind speed from 111 meteorological stations in the region, as well as the MODIS normalized difference vegetation index (NDVI) and land surface temperature (LST) data, remote sensing, GIS and principal component analysis (PCA) methods were used, and the existing remote sensing ecological index (RSEI) was improved. A regional integrated eco-climatic index (IECI) model was constructed from the aspects of dryness/wetness, comfortableness, greenness, heat and air cleanliness, and the dynamic change characteristics of the eco-climate in YRD urban agglomeration were analyzed. The results showed that during the period from 2001 to 2018, the fractional vegetation cover (FVC) of the urban agglomeration increased significantly with a linear trend of 2.80% per decade, the mixed layer height (MLH) decreased significantly at a rate of 51.3 m per decade, and the regional IECI decreased significantly with a linear trend of 0.10 per decade, showing a regional overall decreasing trend. Human activities and urbanization have significant effects on eco-climate change in the YRD urban agglomeration. It is necessary to strengthen the protection and improvement of eco-climate while promoting economic and social development, so as to achieve harmonious coexistence between humans and nature.

Key words: eco-climate; dynamic change; MODIS; Yangtze River Delta urban agglomeration

0 引言

城市群作为城市发展的最高空间组织形式,已经成为我国经济高速增长的重要引擎和拉动所在区域发展的核心区^[1]。然而,随着城市化进程的持续推进和经济的高速发展,城市群面临着诸多问题,如人口膨胀、资源短缺、环境污染等^[1-4],影响到城市居民的生活质量和社会经济的可持续发展。城市群生态气候特征、生态安全和居住环境质量已成为生态学、环境学和社会科学的研究热点,引起了诸多学者的广泛关注^[5-8]。

已有一些研究开展了城市群生态气候相关特征及变化分析^[1,4-6],但多是基于徐涵秋^[9]提出的耦合植被指数、湿度分量、地表温度和建筑指数/土壤指数评价指标的遥感生态指数(Remote Sensing Ecological Index, RSEI),从绿度、湿度、热度和干度对城市生态状况进行评价^[10-11],未充分考虑人是城市的主体、人与周边环境的相互作用关系最为直接并对城市生态环境变化起主导作用^[12-13]这一特征。

近年来一些研究对 RSEI 指数进行了适当改进,并取得了较好的应用效果,如马鹏飞等^[14]在 RSEI 绿度、湿度、干度和热度指标的基础上加入 PM_{2.5} 浓度,构建新型遥感生态指数;王美雅和徐涵秋^[15]选取对超大城市生态有重要影响的因子,包括空气质量指数、路网

密度、生态连接度、热度、绿度、干度和湿度,建立了城市生态评价遥感指数;史有瑜等^[8]从空气质量、生态环境、人居环境气候舒适度、灾害性天气等方面对河北省 11 个地市的生态气候宜居性进行了评估。

评估城市群生态气候环境,一般采用层次分析法(Antalytic Hierarchy Process, AHP)结合专家咨询法(Delphi 法),从评估指标体系建立、指标权重赋值计算、综合评估模型构建等方面来开展。与 AHP-Delphi 法相比,PCA 法中各指标的权重不是人为确定的,而是根据各个指标对主成分的贡献度来确定。因此,PCA 与 RSEI 指数的结合可以降低实际应用中的主观性和指标提取的难度,保证结果更为客观合理^[9]。

鉴于此,本文在 MODIS 卫星遥感生态环境数据和气象站点气候数据的支持下,基于改进的 RSEI 指数和 PCA 方法,建立了长三角城市群生态气候评价指标体系和模型,并开展了 2001~2018 年期间区域生态气候的变化研究。研究结果对区域生态文明建设、宜居城市更新以及气候变化风险适应等都具有十分重要的现实意义和科学参考价值。

1 资料与方法

1.1 数据资料

本文所用的数据主要包括 2001~2018 年长

三角城市群 111 个站点逐日和日内 4 个(02 时、08 时、14 时和 20 时)或 3 个观测时次(08 时、14 时和 20 时)的气温、湿度、风速、降水量、云量等观测数据。该数据来自于国家气象科学数据中心(<http://data.cma.cn>), 且都经过了初步的质量控制。

本文还利用了美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA) MODIS 卫星所提取的 2001~2018 年 NDVI 数据(<http://reverb.echo.nasa.gov>)和 LST 数据(<https://ladsweb.nascom.nasa.gov/search>)。其中, NDVI 数据来自于 MOD13Q1 产品, 其时间分辨率和空间分辨率分别为 16 d 和 250 m; LST 数据来自于 MOD11A2 产品, 其时间分辨率和空间分辨率分别为 8 d 和 1 km。

1.2 研究方法

1.2.1 生态气候指标选取

选取与城市人居环境密切相关的生态气候指标, 包括标准化降水蒸散指数(Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI)^[16]、人体舒适度日数(Human Comfort Days, HCD)^[7]、植被覆盖度(Fractional Vegetation Cover, FVC)、LST^[17]和混合层高度(Mixed-Layer Height, MLH)^[18], 从区域干湿度、舒适度、绿度、热度、空气洁净度等方面, 研究长三角城市群生态气候的时空动态变化特征。

1.2.2 综合生态气候指数模型的构建

采用综合生态气候指数(Integrated Eco-climatic Index, IECI)来反映区域生态气候的整体状态。由于 5 个生态气候指标的量纲不同, 为了减少不同指标数值大小对评估结果的影响, 首先采用式(1)对其进行标准化处理。

$$NI = (I - I_{\min}) / (I_{\max} - I_{\min}) \quad (1)$$

式中, NI 为标准化处理后的指标值; I 为该指标的数值大小; $I_{\max}$ 和 $I_{\min}$ 分别为该指标的最大值和最小值。

基于长三角城市群 2001 年以来 SPEI、HCD、FVC、LST 和 MLH 逐年时间序列的标

准化值, 采用 PCA 法获取了 5 个生态气候指标的权重值。由于前三个主成份的累积方差贡献率达到 88.5%, 且前三个主成份特征值大于 1, 故认为前三个主成份可以反映长三角城市群生态气候的总体状况。

由前三个主成份的成份得分系数矩阵和方差贡献率构建出区域综合生态气候指数模型:

$$EC = -0.20NI_{LST} + 0.13NI_{FVC} + 0.24NI_{SPEI} + 0.18NI_{HCD} + 0.21NI_{MLH} \quad (2)$$

式中, EC 为综合生态气候指数(IECI); NI_{LST} 、 NI_{FVC} 、 NI_{SPEI} 、 NI_{HCD} 和 NI_{MLH} 分别为 LST、FVC、SPEI、HCD 和 MLH 的标准化值。IECI 值越大, 表明生态气候状况越好。

1.2.3 生态气候动态变化分析

基于长三角城市群站点/格点 2001~2018 年生态气候单项指标和综合指数的逐年数据, 利用普通最小二乘(Ordinary Least Square, OLS)回归法^[19]生成站点/格点尺度变化趋势值。同时, 基于研究区逐年所有站点/格点数值, 采用平均的方法生成整个长三角城市群生态气候指标或指数的年值序列, 并在 Microsoft Excel 中绘制其年际变化曲线图, 然后根据曲线的年际动态、线性变化趋势值及其决定系数值, 分析生态气候特征在整个研究区的时间波动和变化倾向。

2 结果分析

2.1 SPEI 和 HCD 的空间变化

2001~2018 年期间, 长三角城市群 SPEI 的变化在长三角城市群多数地区介于 -0.70~0.35 之间, 且 SPEI 减少的空间范围远大于 SPEI 增加的范围, 即长三角城市群呈干化趋势, 如图 1(a)所示。在长三角城市群南部和北部地区, SPEI 变化趋势差异的空间规律性不明显。过去 18 年间, HCD 的变化没有明显的空间规律性: 在多数地区, HCD 变化介于 -6~6 d/10a, 如图 1(b)所示; 在北部和南部地区, HCD 减少的区域多于增加的区域; 而在中部地区, HCD 增加的区域略多于减少的区域。

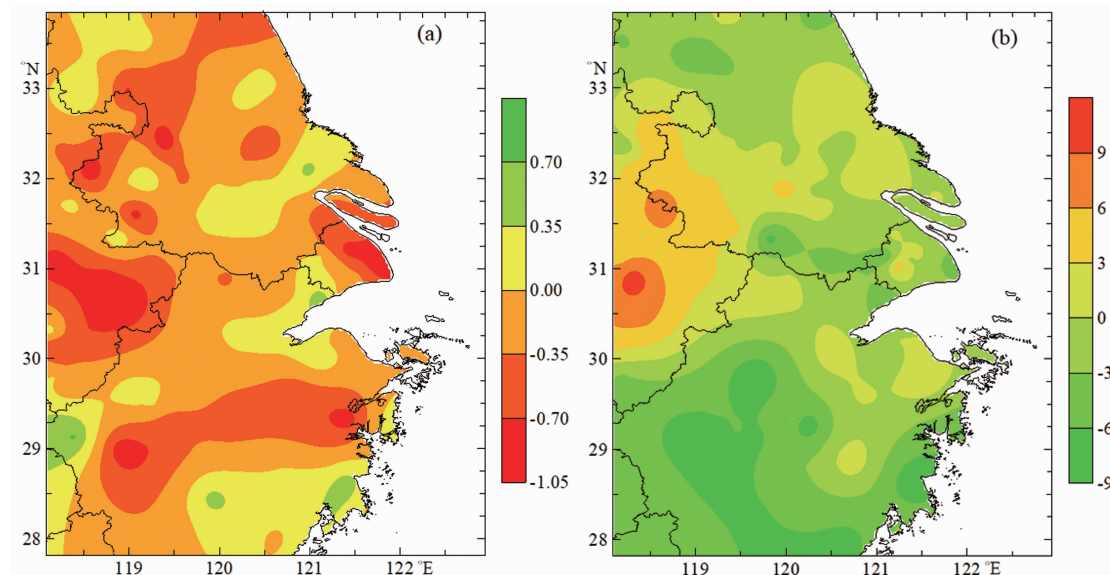


图 1 (a)长三角城市群 SPEI 的空间变化(单位: $/10a$); (b)长三角城市群 HCD 的空间变化(单位: $d/10a$)

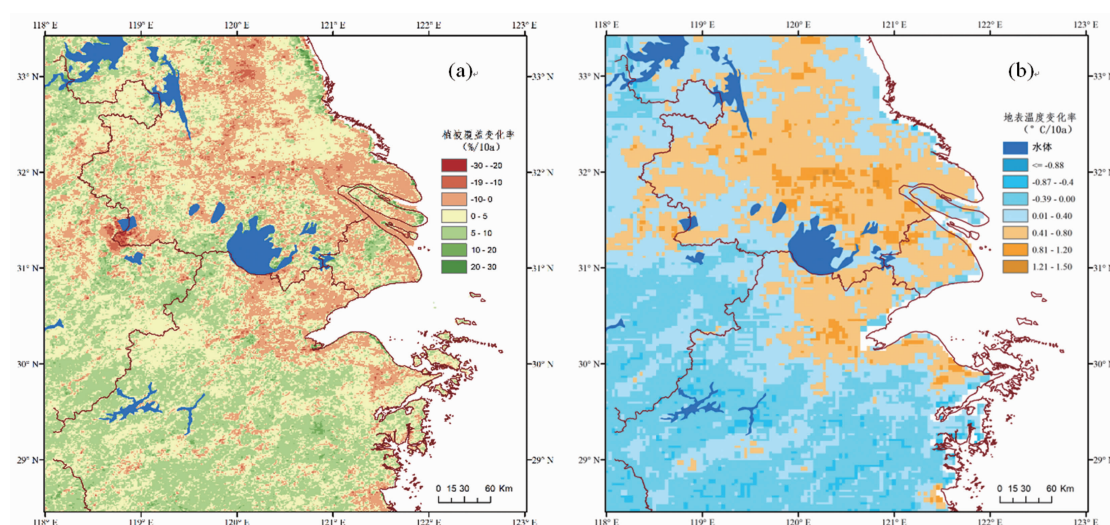


图 2 (a)长三角城市群 FVC 的空间变化(单位: $\%/10a$); (b)长三角城市群 LST 的空间变化(单位: $^{\circ}C/10a$)

2.2 FVC 和 LST 的空间变化

2001~2018 年期间, 长三角城市群 FVC 在多数地区都呈现出增加趋势, 但增幅较小, 多介于 $0\sim10\%/10a$ (见图 2(a))。在一些城市及周边, FVC 多以不超过 $10\%/10a$ 的速率降低, 降低区域主要集中于江苏南部、上海和浙江北部。在上海中心城区、江苏中部沿海一些地区, FVC 呈现出较为明显的增加。过去 18 年间, LST 在北部和中东部多数地区, 包括江苏南部大部分地区、上海和浙江东北部, 都呈现出增加趋势, 增幅多在 $0\sim1.2^{\circ}C/10a$ 之间; 但在南部和西部一些地区, LST 多以 $0\sim0.9$

$^{\circ}C/10a$ 的速率降低, 降低区域主要集中于安徽东南部、浙江西部和南部, 如图 2(b)所示。

2.3 MLH 和 IECI 的空间变化

2001~2018 年期间, 长三角城市群 MLH 总体上的空间变化规律不明显, 相对而言, 在多数地区都呈现出降低趋势, 但降幅多在 $0\sim160\text{ m}/10a$ (见图 3)。在长三角城市群中北部的江苏南部与安徽交界处, MLH 多以 $0\sim160\text{ m}/10a$ 的速率升高。过去 18 年间, IECI 在整个长三角城市群基本上都呈现出降低趋势, 降幅多介于 $0\sim0.14/10a$, 并且在长三角北部地区(尤其是江苏南部区域), 降低趋势最为明

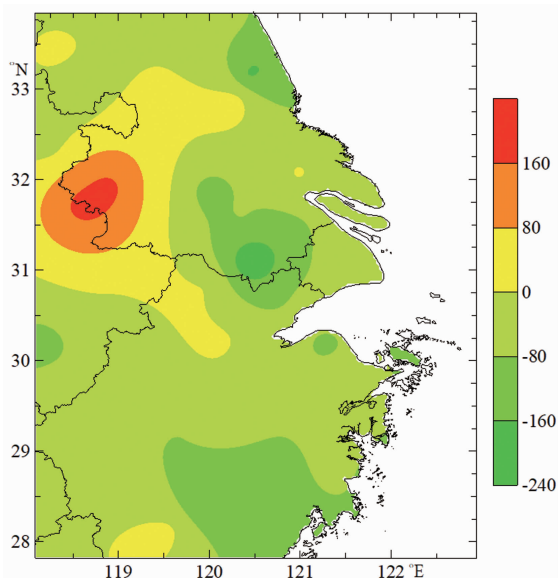


图 3 长三角城市群 MLH 的空间变化(单位: m/10a)

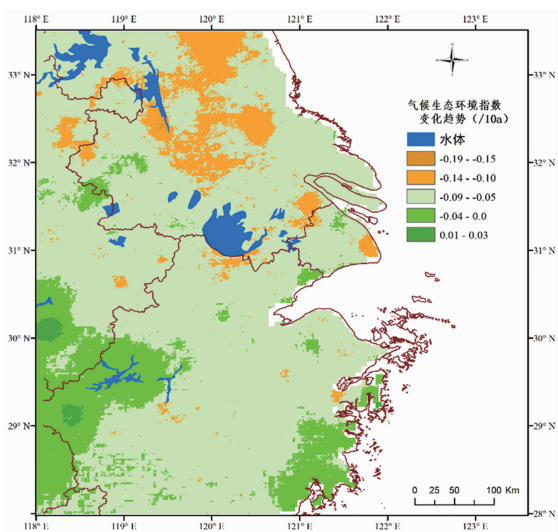


图 4 长三角城市群 IECI 的空间变化

显,表明本世纪以来长三角地区大规模城市化和工业发展对当地生态气候环境已造成显著的影响(见图 4)。近年来,长三角地区以全国 4% 的国土面积,集聚了全国约 17% 的人口,创造了全国 24.4% 的经济总量,是我国经济贡献强度最高的地区,生态环境则长期处于严重超载状态。因此,长三角城市群生态气候呈现出区域性整体降低趋势。

2.4 生态气候指标的年际分布及变化

2001~2018 年期间,长三角城市群区域平均 SPEI 和 HCD 分别以 0.23/10a 和 0.53 d/10a 的线性趋势减少,但在统计上均不显著,

如图 5(a)和图 5(b)所示。SPEI 在 2001 年最高(0.67),而在 2010 年最低(-0.43)。HCD 在 2014 年最高(216 d),而在 2010 年最低(173 d)。城市群区域平均 FVC 以 2.80%/10a 的线性趋势显著增加,如图 5(c)所示。FVC 在 2015 年最高(55.93%),而在 2001 年最低(50.86%)。区域平均 LST 在 2001~2018 年期间以 0.21 °C/10a 的线性趋势增加,但在统计上也不显著。LST 在 2017 年最高(16.1°C),而在 2012 年最低(14.5°C),如图 5(d)所示。区域平均 MLH 以 51.3 m/10a 的线性趋势显著降低,MLH 在 2001 年最高(898.4 m),而在 2018 年最低(786.2 m),如图 5(e)所示。过去 18 年间,区域平均 IECI 以 0.10/10a 的线性趋势显著降低(见图 5(f)),表明区域生态气候整体上朝着变差的方向发展。IECI 在 2010 年最低(0.031),而在 2005 年最高(0.425)。

3 结束语

本文基于地面气象站点气候数据和 MODIS 遥感监测数据,通过对现有的 RSEI 进行改进,从干湿度、舒适度、绿度、热度、空气洁净度等方面,构建了长三角城市群 IECI 评估指标体系和模型,分析了区域生态气候的动态变化特征。该研究对长三角城市群生态文明建设与城市化耦合协调发展具有重要的指示意义,也对区域资源环境承载力评价和气候变化风险适应具有一定的参考和借鉴价值。

2001~2018 年期间,长三角城市群 IECI 以 0.10/10a 的线性趋势显著降低,并呈现出区域性整体降低的特征,尤其是在江苏南部区域内降低趋势最为明显。其间,FVC 以 2.80%/10a 的线性趋势显著增加,MLH 以 51.3 m/10a 的线性趋势显著降低,SPEI 和 HCD 分别以 0.23/10a 和 0.53 d/10a 的线性趋势略减少,LST 以 0.21 °C/10a 的线性趋势略增加。

长三角城市群 IECI 变化是全球气候变化和区域城市化、人类活动的综合结果。本世纪以来,区域大规模城市化、工业化和人类活动

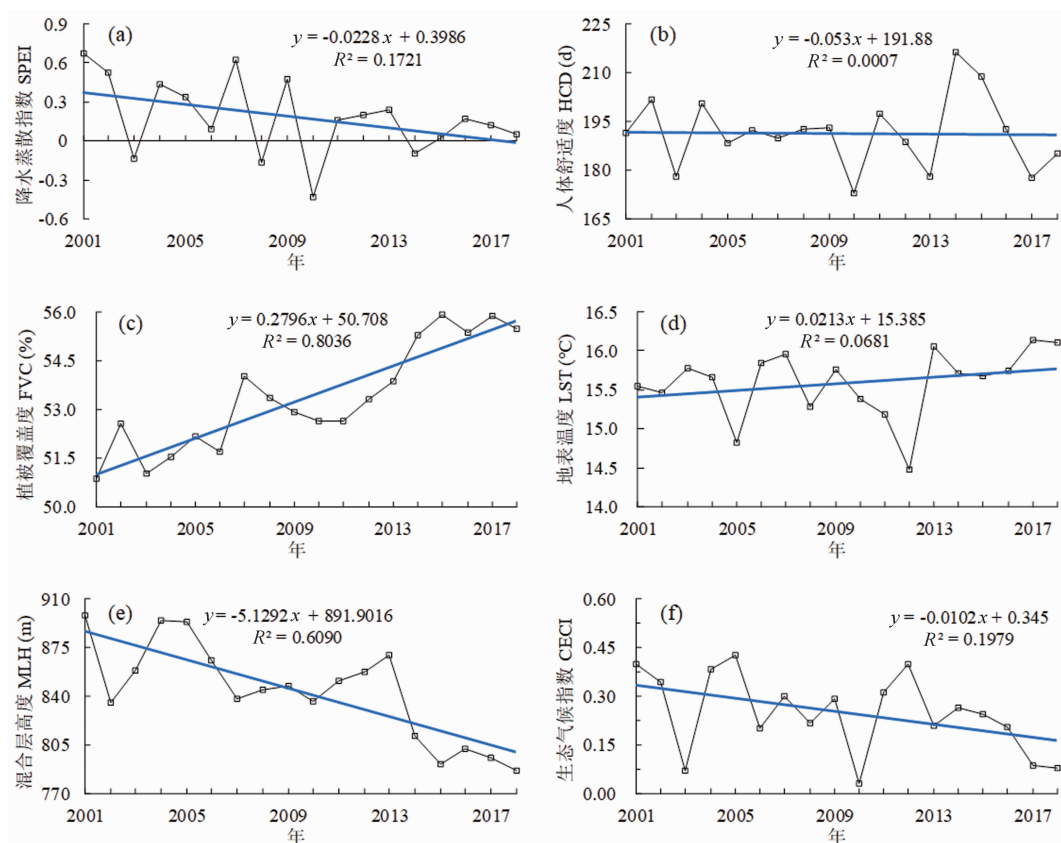


图 5 2001~2018 年长三角城市群单项和综合生态气候指标的年际变化

对当地生态气候已造成显著的影响, 但本文并未对其开展定量分析, 需要在今后的研究中深入分析城市化、人类活动的区域生态气候效应, 明确其影响机制和作用过程及贡献, 并推动当地在经济社会快速发展的同时加强生态气候的保护和改善, 从而实现人与自然和谐共生。

参考文献

- [1] 郑子豪, 吴志峰, 陈颖彪, 等. 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 [J]. 生态学报, 2021, **41**(2): 717-729.
- [2] Wu S J, Chan T O, Zhang W, et al. Increasing compound heat and precipitation extremes elevated by urbanization in South China [J]. *Frontiers in Earth Science*, 2021, **9**: 636777.
- [3] 杨宜男, 李敬, 王立, 等. 长三角地区城市化对典型生态系统服务供需的影响 [J]. 自然资源学报, 2022, **37**(6): 1555-1571.
- [4] 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.
- [5] 方林, 蔡俊, 刘艳晓, 等. 长三角地区生态系统服务价值动态演化及驱动力分析 [J]. 生态与农村环境学报, 2022, **38**(5): 556-565.
- [6] 何天星, 田宁, 周锐, 等. 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 [J]. 生态学杂志, 2023, **42**(2): 436-444.
- [7] 吉莉, 李家启, 苟思, 等. 重庆地区人体舒适度日数时空变化特征 [J]. 气象与环境学报, 2014, **30**(1): 88-94.
- [8] 史有瑜, 曹晓霞, 王秀玲, 等. 河北省城市生态气候宜居性评估 [J]. 气象与环境科学, 2019, **42**(3): 102-109.
- [9] 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.
- [10] 缪鑫辉, 梁勤欧. 基于遥感生态指数的甬江流域生态环境变化分析 [J]. 长江流域资源与环境, 2021, **30**(2): 427-438.
- [11] Lu J Q, Guan H L, Yang Z Q, et al. Dynamic

- monitoring of spatial-temporal changes in eco-environment quality in Beijing based on remote sensing ecological index with Google Earth Engine [J]. *Sensors and Materials*, 2021, **33**(12): 4595–4606.
- [12] Li G M, He B B, LI L, et al. Ecological functions and human activity interference evaluation in ecological protection redline for urban environment [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2021, **87**(6): 413–420.
- [13] 张渝晨, 田宏伟. 近 17 a 郑州城市热岛时空演变及驱动机制分析 [J]. *干旱气象*, 2023, **41**(3): 403–412.
- [14] 马鹏飞, 张安兵, 王贺封, 等. 基于改进遥感生态指数的矿区生态环境监测及驱动因素分析 [J]. *生态与农村环境学报*, 2023, **39**(12): 1580–1590.
- [15] 王美雅, 徐涵秋. 中外超大城市生态质量遥感评价 [J]. *生态与农村环境学报*, 2021, **37**(9): 1158–1167.
- [16] Vicente-Serrano S M, Beguería S, López-Moreno J I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index [J]. *Journal of Climate*, 2010, **23**(7): 1696–1718.
- [17] Wan Z M. Collection-6 MODIS land surface temperature products users' guide [EB/OL]. https://modis-land.gsfc.nasa.gov/pdf/MOD11_User_Guide_V61.pdf, 2019.
- [18] 陈建文, 胡琳, 王娟敏, 等. 陕西省混合层高度变化规律研究 [J]. *水土保持研究*, 2014, **21**(5): 322–326.
- [19] Cui L L, Shi J, Xiao F J. Change and relationship between growing season metrics and net primary productivity in forestland and grassland in China [J]. *Carbon Balance and Management*, 2023, **18**: 26.