

# 基于谷歌地球引擎平台的中国城市环境质量 分区和分规模动态评估

王艺锦<sup>1,2</sup>, 白岩松<sup>1,2</sup>, 岳铠鸿<sup>2</sup>, 谷天赐<sup>1,2</sup>, 朱国梁<sup>1,2</sup>, 黄庆旭<sup>1,2\*</sup>

(1. 地表过程与水土风沙灾害风险防控全国重点实验室(北京师范大学), 北京 100875; 2. 北京师范大学地理科学学部自然资源学院, 自然资源部土地利用重点实验室, 北京 100875)

**摘要:** [目的] 城市环境评估可以识别城市发展各阶段所面临的环境问题, 为城市环境保护策略的制定提供科学依据。本研究旨在分析评估城市内不同区域和不同规模城市的环境差异。[方法] 基于谷歌地球引擎平台, 利用遥感数据构建综合环境指数(comprehensive environment index, CEI), 对 2000—2020 年的中国城市环境质量进行评估, 并对比老城区、扩展区和城郊区, 以及不同规模城市的环境质量差异。[结果] 全国城市环境质量呈显著“U”形变化: 2000—2013 年 CEI 从 0.464 降至 0.425, 此后大幅上升, 2020 年达到最高值 0.499。老城区环境最差但改善幅度最大(11.3%), 城郊区环境最好但改善幅度最小(5.2%)。不同规模对比显示, 城市规模越大, 城市内部各区域环境均越差, 超大城市的环境改善幅度最大(8.3%), 特大城市的环境改善幅度最小(4.6%)。[结论] 2013 年后, 随着环境治理政策的实施, 空气质量和城市绿化情况明显改善, 但城市地表热环境的治理仍面临挑战。未来需进一步针对不同区域的环境特点和问题实施差异化的环境治理策略, 以缓解城市扩展和气候变化带来的压力, 推动城市高质量、可持续发展。

**关键词:** 城市化; 谷歌地球引擎; 城市环境评估; 综合环境指数; 城市可持续性

中图分类号: X321

文献标志码: A

文章编号: 0438-0479(2025)03-0528-10

## Dynamic assessment of urban environmental quality among zones and city sizes in Chinese cities based on the Google Earth Engine platform

WANG Yijin<sup>1,2</sup>, BAI Yansong<sup>1,2</sup>, YUE Kaihong<sup>2</sup>, GU Tianci<sup>1,2</sup>,  
ZHU Guoliang<sup>1,2</sup>, HUANG Qingxu<sup>1,2\*</sup>

(1. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Disaster Risk Reduction (Beijing Normal University), Beijing 100875, China; 2. Key Laboratory of Land Use, Ministry of Natural Resources, School of Natural Resources, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**Abstract:** [Objective] Rapid urbanization in China has led to complex environmental challenges, including deteriorated air quality, reduced green spaces, and intensified urban heat islands. These issues underscore the need for effective environmental assessments that can inform sustainable urban planning and policy-making. Urban environmental assessment can help identify environmental challenges at different stages of urban development, providing a scientific basis for formulating environmental protection strategies. However, existing research lacks a quantitative evaluation of environmental quality variations across different urban zones and city sizes. This study aims to address this gap by utilizing the Google Earth Engine platform and integrating multiple sources of remote sensing data to construct a comprehensive environment index (CEI). [Methods] The CEI was developed by aggregating three key

收稿日期: 2024-10-08 录用日期: 2025-02-09

基金项目: 国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目(42361144859); 北京师范大学地理科学学部科研团队资助项目(2024-KYTD-09)

\* 通信作者: qxhuang@bnu.edu.cn

引文格式: 王艺锦, 白岩松, 岳铠鸿, 等. 基于谷歌地球引擎平台的中国城市环境质量分区和分规模动态评估[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2025, 64(3): 528-537.

Citation: WANG Y J, BAI Y S, YUE K H, et al. Dynamic assessment of urban environmental quality among zones and city sizes in Chinese cities based on the Google Earth Engine platform[J]. J Xiamen Univ Nat Sci, 2025, 64(3): 528-537. (in Chinese)



environmental factors;  $PM_{2.5}$  concentration, vegetation cover (VC), and land surface temperature (LST). These metrics were normalized, with higher scores indicating better environmental quality. The CEI enabled a quantitative assessment of urban environmental quality, capturing both temporal and spatial variations. In addition, urban areas were categorized into three distinct zones (old urban areas, expanded areas, and suburban areas), while cities were classified by size, ranging from small cities to super-large metropolitan areas. Binary segmentation analysis was employed to identify significant breakpoints in the CEI time series. By examining the changes in CEI from 2000 to 2020, this study provides a longitudinal perspective on environmental quality trends across Chinese cities of varying sizes, offering valuable insights to support region-specific, sustainable urban development strategies.

**[Results]** A significant "U-shaped" trend in the CEI emerged, reflecting three main phases of urban environmental quality in China. Initially, from 2000 to 2007, the CEI declined from 0.464 to 0.430, indicating a general deterioration in urban environmental quality likely due to rapid urbanization and industrialization. In the second phase between 2008 and 2012, the CEI stabilized around 0.444, reflecting a temporary balance between urban expansion and emerging environmental policies. The final phase began in 2013, with the CEI rebounding significantly, reaching a peak of 0.499 by 2020. This improvement was largely attributed to the implementation of rigorous environmental policies, such as air quality control measures and urban greening initiatives. Across urban zones, old urban areas consistently exhibited the poorest environmental quality but showed the highest rate of improvement over time (11.3%). In contrast, suburban areas maintained the best environmental quality, although their improvement rate was the lowest (5.2%). Expanded areas showed moderate environmental condition and improvement rate, underscoring the transitional nature of these zones. When comparing cities of varying sizes, larger cities faced more severe environmental challenges across all sizes. Notably, megacities demonstrated the most substantial improvements in CEI (8.3%), suggesting that large-scale policy interventions had a particularly significant impact in densely populated areas.

**[Conclusion]** These findings underscored the critical role of environmental policies in driving positive changes in urban environmental quality across China. While substantial progress has been made in improving air quality and urban VC since 2013, challenges remain in mitigating the urban heat island effect, particularly in old urban areas, megacities and super-large cities. These results suggested that future environmental strategies should be customized according to regional characteristics, addressing place-specific environmental needs of various urban zones and city sizes. Region-specific policy interventions are essential to mitigate the pressures of urban expansion and climate change, and to promote a balanced, high-quality, and sustainable urban development in China.

**Keywords:** urbanization; Google Earth Engine; urban environmental assessment; comprehensive environment index; urban sustainability

自改革开放以来,中国经历了快速的城市发展过程,各类要素从乡村向城市聚集.要素的空间再配置促进了实物资本和人力资本的快速积累,形成了巨大的经济增长动力<sup>[1]</sup>.同时,人口和经济增长带来的城市在空间上的高度聚集和迅速扩展,使得环境问题凸显<sup>[2]</sup>,城市环境状况已成为影响城市发展的主要因素之一<sup>[3]</sup>.近年来,我国持续强调经济与环境的协同发展,将生态文明建设融入新型城镇化全过程<sup>[4-7]</sup>.联合国在《变革我们的世界:2030年可持续发展议程》中同样提出“建设可持续的城市和人类住区”目标<sup>[8]</sup>.经济与环境保护协调发展已成为实现可持续发展的必由之路,及时有效地测度和评价城市环境状况,对促进城市可持续发展具有重要意义<sup>[9]</sup>.

为评估城市环境变化,联合国可持续发展委员会、联合国人类住区规划署等国内外组织机构提出了很多综合性环境评价指标,如生态足迹指数<sup>[10]</sup>、环境绩效指数<sup>[11]</sup>及绿色城市指数等<sup>[12]</sup>.目前指标体系大多依赖于统计数据,难以从空间上准确评估城市环境质量,特别是城市内部不同区域之间的环境质量变

化.相比之下,遥感技术具有实时、快速、大范围监测的优势,已逐渐成为评价区域环境质量的有效手段之一.

目前,已有不少研究者利用各种环境遥感数据,从不同尺度对城市地区的特定环境状况进行监测和评价工作.例如:王桂林等<sup>[13]</sup>使用遥感估算的细颗粒物(particulate matter 2.5,  $PM_{2.5}$ )浓度数据和城市不透水表面数据分析了京津冀地区城市扩展对  $PM_{2.5}$  污染的影响; Yao 等<sup>[14]</sup>利用中分辨率成像光谱仪(moderate-resolution imaging spectroradiometer, MODIS)增强植被指数遥感数据产品分析了非洲地区及长江流域城市扩展对植被的影响.还有一些研究分析了城市地区的整体环境变化.例如:徐涵秋<sup>[15]</sup>基于绿度、湿度、热度和干度构建了遥感生态综合指数,定量评价并对比分析了福州市主城区的生态质量; He 等<sup>[16]</sup>构建城市综合环境指数(comprehensive environment index, CEI),评价了我国城市群和快速城市化地区的环境退化程度.

然而,目前城市环境评估领域的相关研究还存在

以下不足:就评价内容而言,已有研究大多仅关注单一环境维度,如大气、植被或土壤等<sup>[14-15,17]</sup>,对城市环境的综合分析较少;而在研究区尺度上,已有研究大多关注整体行政区范围的城市环境,少有研究分析城市内部不同区域和不同规模城市的环境差异。

为更好地了解中国城市环境状况,本研究基于谷歌地球引擎(Google Earth Engine,GEE)平台和多源遥感数据,利用 CEI 评估 2000—2020 年中国城市内不同区域和不同规模城市的综合环境状况,以识别城市发展各个阶段所面临的环境问题,为城市发展过程中有针对性的环境保护策略的制定提供科学依据。

## 1 研究区域与数据来源

### 1.1 研究区域

本研究的研究区域为中国的 375 个城市。参考国务院 2014 年发布的《关于调整城市规模划分标准的通知》<sup>[18]</sup>,以第七次人口普查数据和各省 2020 年统计年鉴城区常住人口为分类标准,将城市划分为 5 类。根据城市用地数据,在城市内部划分了老城区、城市扩展区(简称扩展区)和城郊区。其中:老城区为 1992 年的城市用地;扩展区为 1992—2020 年扩展的城市用地;参考 Li 等<sup>[19]</sup>的研究,将城郊区定义为 2020 年城市用地外 2 km 的缓冲区(图 1)。

由于本研究所界定的老城区是基于 1992 年已存

在的城市用地,而当时部分城市(尤其是我国西部地区的多数城市)的土地面积较小,本研究最终选取 262 个具有 1992 年老城区数据的城市进行研究。根据城市规模划分标准,选取了北京市和上海市等 10 个超大城市(城区常住人口>1 000 万)、杭州市和郑州市等 28 个特大城市(500 万<城区常住人口≤1 000 万)、唐山市和南昌市等 187 个大城市(100 万<城区常住人口≤500 万)、朔州市和普洱市等 34 个中等城市(50 万<城区常住人口≤100 万)、金昌市和铜川市等 3 个小城市(城区常住人口≤50 万)。

### 1.2 数据来源

本研究所用的城市用地数据来源于文献<sup>[20-22]</sup>基于全卷积网络模型提取的城市区域。该数据集整合多源遥感数据,同时结合多尺度特征,是目前全球范围内已有的准确性较高的城市数据集<sup>[20-22]</sup>。

本研究所用的 PM<sub>2.5</sub> 浓度数据来自 Wei 等<sup>[23-24]</sup>发布的 CHAP(China High Air Pollutants)数据集最新版本(V4),下载自 Zenodo 平台(<https://zenodo.org/>)。地表温度(land surface temperature,LST)数据使用美国国家航空和航天局(National Aeronautics and Space Administration,NASA)发布的 Aqua-MODIS 8 d 夜间 LST 平均值合成数据 MYD11A2 V6 产品<sup>[25]</sup>。归一化植被指数(normalized difference vegetation index,NDVI)采用 NASA 戈达德航天航空中心发布的 MOD13A2 V6.1 产品<sup>[26]</sup>。这些数据的空间分辨率均为 1 km,时间范围为 2000—2020 年。

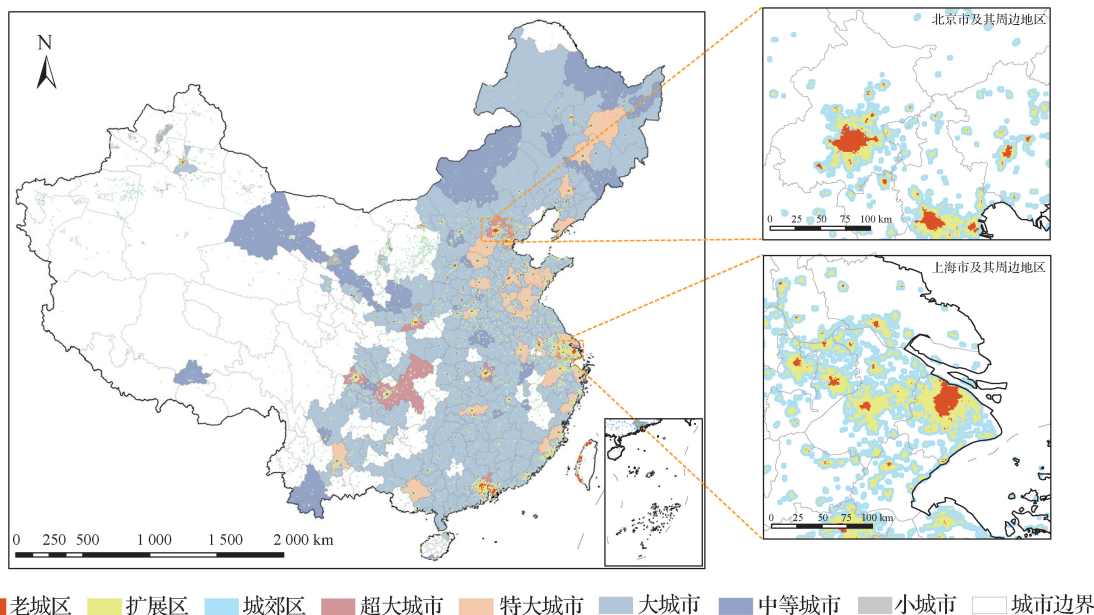


图 1 研究区(审图号为 GS(2024)0650)

Fig. 1 Study area (map content approval number:GS(2024)0650)

## 2 研究方法

### 2.1 构建 CEI

#### 2.1.1 获取与预处理数据

使用年均值合成法,在 GEE 平台获取全国 2000—2020 年空间分辨率为 1 km 的 LST 与 NDVI 数据. 植被覆盖度(vegetation cover, VC)由 NDVI 进行运算得到<sup>[27]</sup>:

$$V_i = (N_i - N_s) / (N_v - N_s),$$

式中,  $V_i$  表示像元  $i$  的 VC,  $N_i$  表示像元  $i$  的 NDVI 年平均值,  $N_s$  和  $N_v$  分别表示研究区所有像元 NDVI 年平均值的最小值和最大值.

本研究使用 2000—2020 年间的最大值和最小值数据将  $PM_{2.5}$  浓度和 LST 进行负向标准化,将 VC 进行正向标准化,标准化的数据范围为 0~1,数值越大

代表该要素得分越高.

#### 2.1.2 计算 CEI

参考 He 等<sup>[16]</sup>构建的城市环境评估方法,采用标准化后的  $PM_{2.5}$  浓度、VC 和夜间 LST 3 项环境指标的得分平均值计算 CEI,具体公式如下:

$$C_i = (P_i + L_i + V_i) / 3,$$

式中,  $C_i$  为像元  $i$  处的 CEI 值,  $P_i$ 、 $L_i$ 、 $V_i$  分别是 2000—2020 年像元  $i$  处的  $PM_{2.5}$  浓度、LST 和 VC 标准化处理后的数值. 将各个研究区内所有像元的 CEI 平均值作为该研究区内特定年份的 CEI 值.

本研究借助 GEE 平台的在线调用和计算能力完成遥感数据的提取与预处理,包括 MODIS 产品筛选、波段选择、NDVI 计算、数据年均值合成与裁剪、指标运算与结果提取(表 1)等方法,极大提高了数据的处理效率和指标计算速度.

表 1 基于 GEE 平台的数据处理方法

Tab. 1 Data processing method based on the GEE platform

方法	数据提取和预处理
ee. ImageCollection( )	选择 MODIS 的 NDVI 影像数据集(MODIS/061/MOD13A2)和 MODIS 的 LST 影像数据集(MODIS/006/MOD11A2)
ee. select( )	选择 MODIS 数据的 NDVI 波段和 LST(夜间)波段
ImageCollection. filterBounds( ), ee. Filter. calendarRange( )	筛选全国范围内 2000—2020 年 1—12 月的影像数据,计算 NDVI 与 LST 的年平均,并将 NDVI 数据乘以 0.000 1 进行缩放
ee. Image. loadGeoTIFF( )	加载 Google 网盘内 $PM_{2.5}$ 影像数据并将其转换为 Image 对象
ee. Image. expression( )	定义 CEI 运算公式,得到 2000—2020 年全国范围内的 CEI 值

### 2.2 识别 CEI 突变年份

双分段回归是一种广泛用于突变点检测的算法,通过递归分段将数据分为不同的区间,识别数据中结构性变化的时点<sup>[28]</sup>. 本研究通过调用 python ruptures 库中的双分段回归方法检测 CEI 时间序列数据的显著突变点<sup>[29]</sup>.

## 3 结果与分析

### 3.1 全国城市的总体 CEI 变化

2000—2020 年,全国城市环境状况呈“U”形变化(图 2). 首先,CEI 从 2000 年的 0.464 下降至 2007 年的 0.430. 2008—2012 年,CEI 虽有所波动,但基本维持在 0.444 附近. 2013 年,全国城市 CEI 降至 0.425,达到最低值. 2013 年之后,CEI 呈显著上升趋势,并于

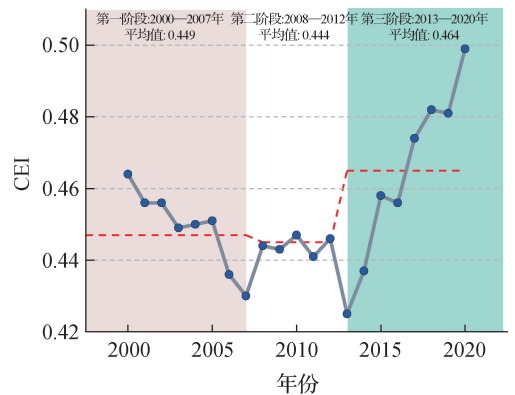


图 2 2000—2020 年全国城市 CEI 变化

Fig. 2 Variation in CEI in Chinese cities from 2000 to 2020

2020 年达到 0.499 的最高值. 分阶段看,2000—2007 年为第一阶段,CEI 平均值为 0.449;2008—2012 年为第二阶段,CEI 平均值为 0.444,略低于前一阶段;

2013—2020 年为第三阶段,CEI 平均值上升至 0.464.

### 3.2 全国城市内部不同区域的 CEI 变化

老城区、扩展区和城郊区环境状况均呈相似的“U”形变化趋势(图 3). 在第一阶段,老城区、扩展区和城郊区的 CEI 分别波动下降至 2007 年的 0.405, 0.427, 0.459. 在第二阶段,CEI 均处于波动平衡状态,分别保持在 0.421, 0.440, 0.472. 而在第三阶段,CEI 在 2013 年发生突变,分别下降到 0.404, 0.420, 0.449, 达到近 20 年最低值. 但在此之后,3 个城区的 CEI 均呈大幅上升趋势,仅在 2016 年和 2019 年有两次小幅回落,并于 2020 年分别上升到 0.483, 0.495, 0.519, 达到近 20 年最高值,表明城市各区域的生态环境状况都得到了显著改善.

从 2000—2020 年 CEI 平均值来看,老城区环境最差(0.430),城郊区环境最好(0.480),扩展区环境状况介于老城区和城郊区之间(0.450). 从 CEI 变化幅度来看,老城区改善幅度最大(11.3%),城郊区改善幅度最小(5.2%),扩展区变化幅度介于两者之间(6.5%).

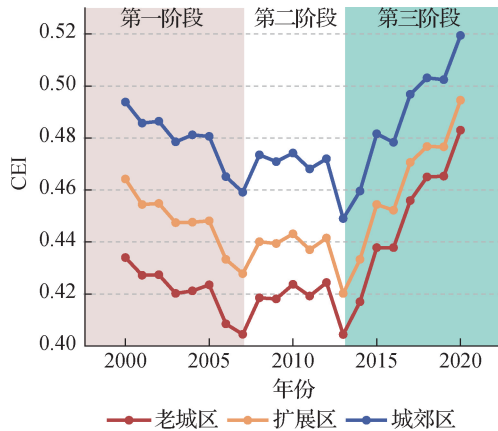


图 3 2000—2020 年全国城市内部不同区域的 CEI 变化  
Fig. 3 Variations in CEI across different urban zones within Chinese cities from 2000 to 2020

### 3.3 不同规模城市的 CEI 变化

整体上 5 种规模城市的 CEI 变化趋势相似,均呈“U”形变化[图 4(a)]. 其中,小城市的 CEI 最高,超大城市的 CEI 最低. 就变化而言,超大城市 CEI 的增幅最大,特大城市的增幅最小. CEI 均值从高到低依次为

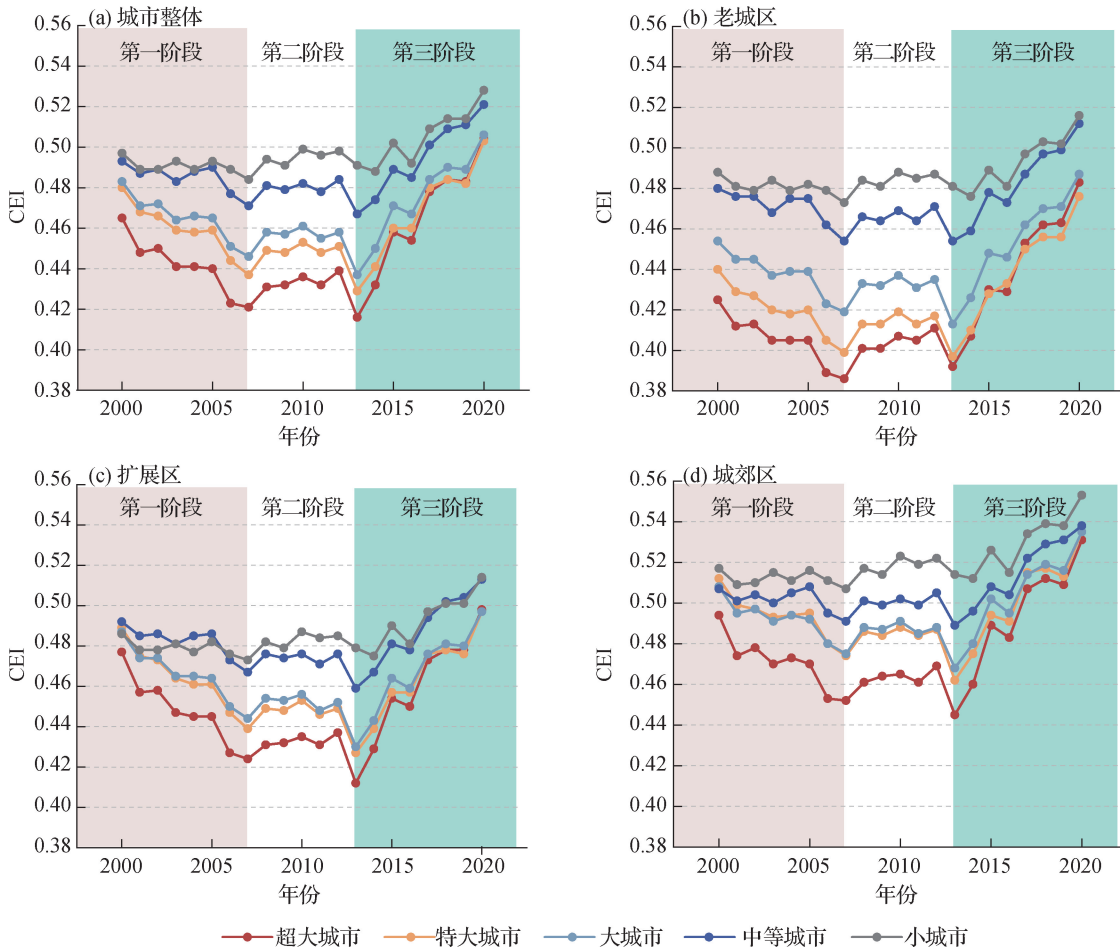


图 4 2000—2020 年不同规模城市 and 不同城区的 CEI 变化

Fig. 4 Variations in CEI across cities of different sizes and different urban zones from 2000 to 2020

小城市(0.497)、中等城市(0.488)、大城市(0.467)、特大城市(0.460)和超大城市(0.448)。2000—2020年间,城市整体 CEI 增幅从高到低依次为超大城市(8.3%)、小城市(6.2%)、中等城市(5.7%)、大城市(4.8%)和特大城市(4.6%)。

就老城区来看[图 4(b)],小城市环境最好但改善幅度最小(5.7%),超大城市环境最差但改善幅度最大(13.8%)。就扩展区来看[图 4(c)],小城市环境最好且改善幅度最大(5.8%),超大城市环境最差,特大城市改善幅度最小(1.6%)。就城郊区来看[图 4(d)],小城市环境最好,超大城市环境最差但改善幅度最大(7.5%),特大城市改善幅度最小(4.5%)。

### 3.4 环境要素时空差异

在 PM<sub>2.5</sub> 浓度、VC 和 LST 这 3 个指标中,PM<sub>2.5</sub> 浓度的变化和 CEI 变化趋势整体相符,对环境质量影响最大,LST 的影响最小(图 5)。分阶段看:PM<sub>2.5</sub> 得分在第二阶段最低(0.690),第三阶段最高(0.753);VC 得分在第一阶段最低(0.413),第三阶段最高(0.433);LST 得分在第二阶段最高(0.219),第三阶段最低(0.208)。

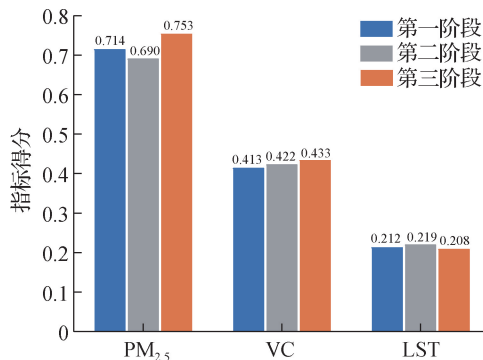


图 5 不同阶段的 PM<sub>2.5</sub> 浓度、VC、LST 得分  
Fig. 5 Scores of PM<sub>2.5</sub> concentration, VC, and LST at different phases

如图 6 所示:随着城市从中心向外扩展,城市空气质量、城市绿化和城市热岛效应逐渐改善。对比城市内部不同区域,3 项环境指标得分均是城郊区最高,扩展区次之,老城区最低。城市内部不同区域内 3 种环境指标的变化趋势呈现较为一致的特征。

如图 7 所示:随着城市规模不断扩大,空气质量逐渐变差,中等城市和大城市在空气质量方面表现较好,而大城市和超大城市在 VC 方面表现较优,中等城

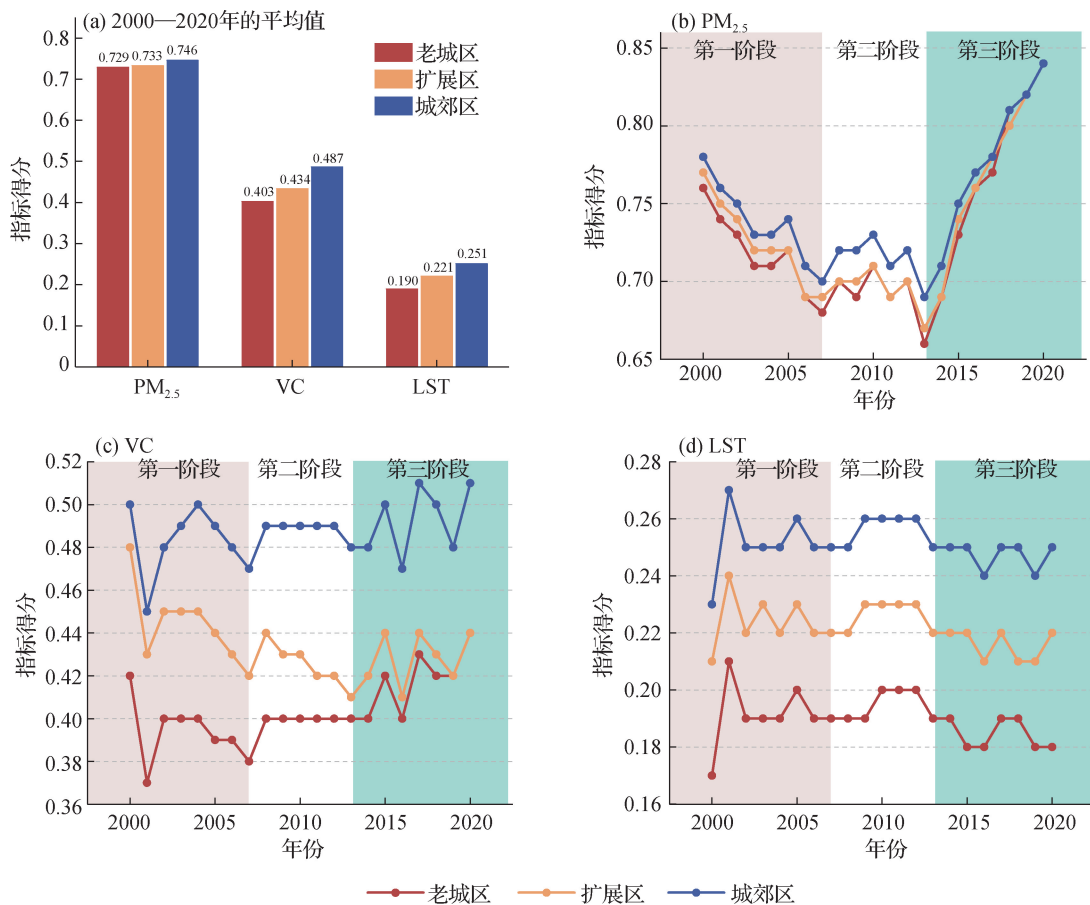


图 6 城市内不同区域的 PM<sub>2.5</sub> 浓度、VC、LST 得分

Fig. 6 Scores of PM<sub>2.5</sub> concentration, VC, and LST in different urban zones

市对 LST 的控制相对更好. 在  $PM_{2.5}$  方面, 中等城市得分最高(0.832), 大城市次之(0.794), 而超大城市和特大城市的  $PM_{2.5}$  得分相对较低(分别为 0.741 和 0.736). 在 VC 方面, 超大城市、特大城市和大城市的

得分较高, 而中等城市和小城市的得分相对较低, 分别为 0.422 和 0.405. 在 LST 方面, 超大城市得分最低(0.206), 中等城市得分最高(0.392). 不同规模城市下 3 种环境指标的变化趋势呈现出较为一致的特征.

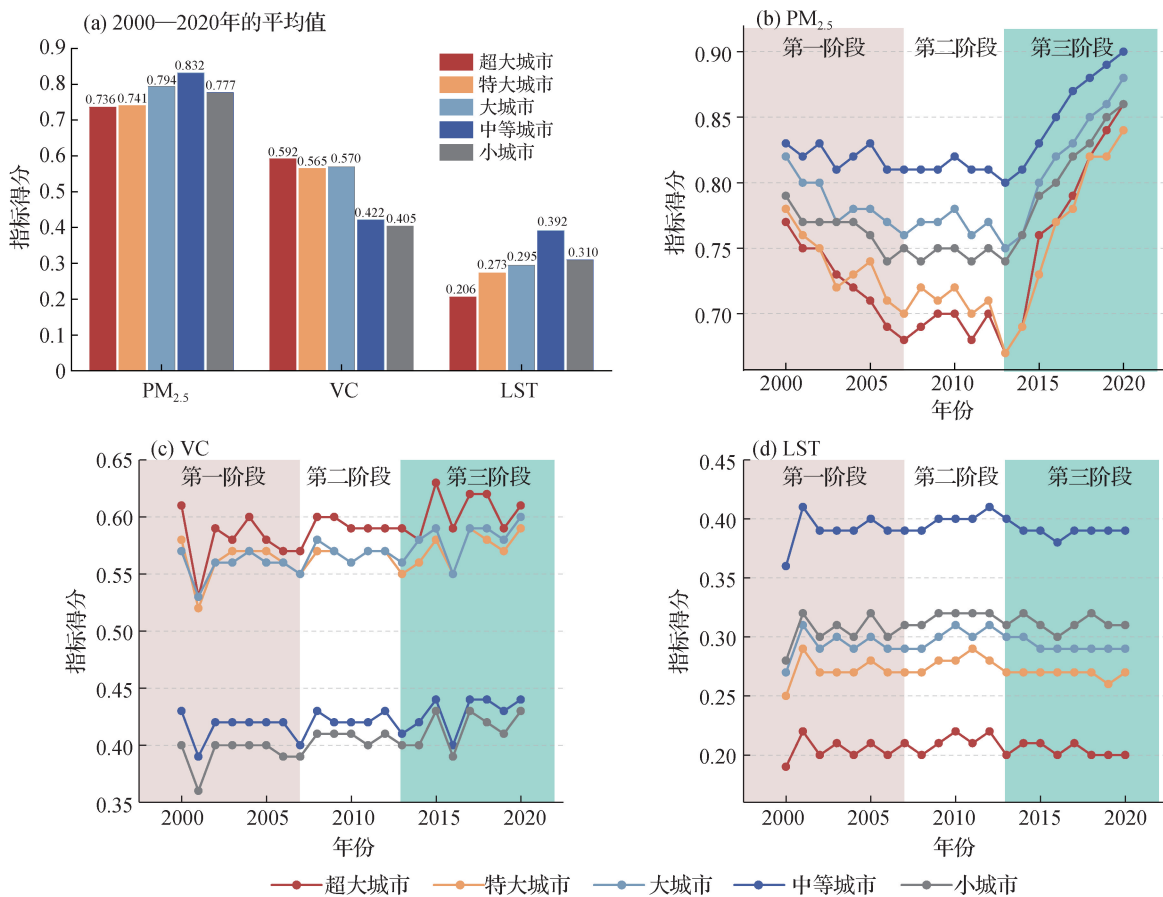


图 7 不同规模城市的  $PM_{2.5}$  浓度、VC、LST 得分

Fig. 7 Scores of  $PM_{2.5}$  concentration, VC, and LST in cities with different sizes

## 4 讨论

### 4.1 研究结果的合理性

本研究发现, 2000—2020 年间城市环境状况分三阶段呈“U”形变化, 与已有城市环境相关研究结果<sup>[30-32]</sup>具有较好的一致性. 研究结果中对于城市环境转折点发生在 2007 年和 2013 年的判断, 也与城市生态建设实际相符合. 2007 年 10 月, 中国共产党第十七次全国代表大会首次把生态文明建设作为一项战略任务和全面建设小康社会新目标明确下来<sup>[33]</sup>. 2013 年国务院印发《大气污染防治行动计划》(后简称《计划》), 提出了空气治理的 10 条举措<sup>[34]</sup>; 原环境保护部组织编制《全国生态保护“十二五”规划》(后简称《规划》)<sup>[35]</sup>, 制定了全面的生态恢复规

划和实施方案. 2016 年国家发展和改革委员会与住房和城乡建设部联合印发《城市适应气候变化行动方案》, 要求打通城市通风廊道, 增加城市的空气流动性, 以缓解城市“热岛效应”和雾霾问题. 自《计划》实施和《规划》发布以来, 全国空气质量总体改善, 重污染天气较大幅度减少<sup>[36]</sup>, 国土绿化行动取得了新成就<sup>[37]</sup>. 此外, 本研究结果也与已有的一些类似分析结果相互印证. 刘荣增等<sup>[38]</sup>通过分析城市扩展的影响发现, 经济发展水平较高的城市扩展地区环境质量的改善速度加快. Xu 等<sup>[39]</sup>对 2000—2015 年中国建设可持续城市 and 社区的评估结果也与本研究的 CEI 动态变化趋势相符. 中国科学院城市环境研究所的评估报告显示, 自 2012 年以来中国东部超大城市群的大气环境质量显著改善, 城市环境治理取得显著成效<sup>[40]</sup>.

## 4.2 城市环境改善建议

城市发展要避免以破坏环境为代价,必须坚持生态优先理念,结合区域特点实施精准的环境治理策略,确保在实现经济增长的同时保持良好的生态环境,推动城市高质量、可持续发展。针对城市发展不同阶段所面临的不同环境问题,结合现有政策,提出未来发展建议,具体如表 2 所示。

## 4.3 不足与展望

本研究采用等权重的方法构建 CEI,假设空气质量、绿化程度和热岛效应对环境的贡献相等。该方法

虽更透明直观,但存在一定局限性。未来研究需考虑不同要素权重,以更准确地评估环境,并引入如水体质量和噪声污染等其他指标,以全面反映城市环境状况。

在研究区选择上,本研究探讨了城市内不同区域和不同规模城市的环境差异,但城市内部区域划分(如老城区)需更合理,小城市的样本量仍待进一步补足。此外,城市等级划分还应综合考虑当地经济体量和产业结构,以更准确地反映城市发展过程中的环境特征。

表 2 城市环境现状与政策建议

Tab. 2 Current situation of urban environment and policy recommendations

区域/规模	发展特征	环境状况	当前环保政策和建议
老城区	属于人口集中区、社会资源集聚,生产空间相对薄弱,污染源主要为生活类	环境最差但改善幅度最大;空气质量最差,绿化空间不足,基础设施老旧,热岛效应显著,环境承载力接近上限	实施城市更新行动,加强城市基础设施建设,推进老旧小区进行基础类、完善类、提升类改造 <sup>[39-42]</sup> ;升级污水处理和垃圾分类设施,通过小型绿地等微生态修复措施,提升环境质量,缓解热岛效应
扩展区	是城市发展的核心区域,生产和生活功能并重,建设活动频繁,土地开发密度高	环境状况介于老城区和城郊区之间;绿地覆盖不足,建筑热岛效应突出,城市扩展带来的环境压力显著	限制开发强度,避免过度开发和滥用城市资源 <sup>[43]</sup> ;严格控制建设密度,合理规划绿地布局,在开发过程中设置生态缓冲区和绿化廊道以降低环境压力;加强对工业排放和建筑施工扬尘的监管力度,推广绿色建筑和节能技术
城郊区	是城市边缘地带,自然生态系统保存较好,土地开发强度低	环境最好但改善幅度最小;空气质量最好,VC 高	划定生态保护红线,对重要生态功能区、生态环境敏感区和脆弱区实行严格保护 <sup>[44]</sup> ,防止过度开发导致环境退化
超大城市	人口密集、工业发达,大气污染和水污染突出,热岛效应严重,环境治理任务重	环境最差但改善幅度最大;城市空气质量最差,热岛效应显著,但绿化程度较好	加强空气治理,深化工业减排和交通污染控制,推广清洁能源;合理规划绿地布局,缓解城市热岛效应,增加垂直绿化,推广使用透水地面
特大城市	具有较高的资源消耗和排放量;人口集中、工业化程度高,空气污染物排放量大	环境差且改善幅度最小;城市空气质量差,热岛效应显著,VC 较高	继续加强空气污染治理,推广清洁能源,强化工业废气排放监管;进行城市生态绿地设计,提高绿化覆盖率,缓解城市热岛效应
大城市	工业发展较快,空气质量差;城市不透水面比例相对较低,VC 较高	环境状况介于更大规模城市 and 中小城市之间;城市空气质量差,VC 较高	继续加强空气污染治理,优化交通结构;保护现有绿地,控制城市扩展过程对生态空间的侵占
中等城市	城市工业发展相对较慢,资源和人口压力相对适中	城市整体环境好,VC 较低	制定城市绿化规划,合理进行绿化布局和生态景观设计,提高城市绿化覆盖率和植被多样性
小城市	工业化程度相对较低,以农业污染为主,工业污染和生活污染强度低	城市整体环境最好,但 VC 较低	制定城市绿化规划,增加道路绿化和公园绿地面积;治理工业和生活污染,防止工业化和城市化带来的环境退化

## 5 结论

2000—2020 年,全国城市环境状况呈“U”形变化。CEI 从 2000 年的 0.464 波动下降至 2007 年的

0.430,2008—2012 年在 0.444 附近波动,2013 年达到近 20 年最低值 0.425,之后呈大幅上升趋势并于 2020 年达到 0.499 的最高值。老城区环境最差但改善幅度最大(11.3%),城郊区环境最好但改善幅度最小(5.2%)。老城区、扩展区和城郊区环境状况均呈相似的

“U”形变化趋势。城市规模越大,城市内部各区域环境均越差,但超大城市的环境改善幅度最大(8.3%)。

未来城市环境治理应继续优先关注空气污染问题,并进一步推进绿地系统建设。在老城区、扩展区以及不同规模的城市(尤其是超大城市和特大城市),加强对城市热岛效应的治理。同时,针对不同规模城市和城市内部不同区域表现出的城市环境问题,需要实施差异化的环境治理策略,推动城市可持续发展。

## 参考文献:

- [1] 中国经济增长前沿课题组,张平,刘霞辉. 城市化、财政扩张与经济增长[J]. 经济研究,2011,46(11):4-20.
- [2] 肖况. 城镇化与生态环境相互作用关系研究:以成都市为例[D]. 成都:西南交通大学,2021.
- [3] 宋世雄,刘志锋,何春阳,等. 城市扩展过程对自然生境影响评价的研究进展[J]. 地球科学进展,2018,33(10):1094-1104.
- [4] 国务院关于印发中国21世纪初可持续发展行动纲要的通知:国发〔2003〕3号[EB/OL]. (2003-01-14)[2024-03-25]. [https://www.gov.cn/zhengce/content/2008-03/28/content\\_2108.htm](https://www.gov.cn/zhengce/content/2008-03/28/content_2108.htm).
- [5] 中央经济工作会议举行 习近平温家宝李克强讲话[EB/OL]. (2012-12-16)[2024-03-25]. [https://www.gov.cn/ldhd/2012-12/16/content\\_2291602.htm](https://www.gov.cn/ldhd/2012-12/16/content_2291602.htm).
- [6] 中央城镇化工作会议举行 习近平、李克强作重要讲话[EB/OL]. (2013-12-14)[2024-03-25]. [https://www.gov.cn/ldhd/2013-12/14/content\\_2547880.htm](https://www.gov.cn/ldhd/2013-12/14/content_2547880.htm).
- [7] 开创生态文明新局面:党的十八大以来以习近平同志为核心的中央引领生态文明建设纪实[EB/OL]. (2017-08-02)[2024-03-25]. [https://www.gov.cn/xinwen/2017-08/02/content\\_5215591.htm](https://www.gov.cn/xinwen/2017-08/02/content_5215591.htm).
- [8] United Nations Department of Economic and Social Affairs. Sustainable cities and human settlements [EB/OL]. [2024-03-25]. <https://sdgs.un.org/topics/sustainable-cities-and-human-settlements>.
- [9] 廖重斌. 环境与经济协调发展的定量评判及其分类体系:以珠江三角洲城市群为例[J]. 热带地理,1999,19(2):171-177.
- [10] REES W E. Revisiting carrying capacity: area-based indicators of sustainability[J]. Population and Environment,1996,17(3):195-215.
- [11] BLOCK S, EMERSON J W, ESTY D C, et al. 2022 environmental performance index[EB/OL]. [2024-03-25]. <https://epi.yale.edu/epi-results/2022/component/epi>.
- [12] United Nations Human Settlements Programme. Global urban indicators database version 2[M/OL]. Nairobi: United Nations Publication,2002[2025-01-11]. <https://unhabitat.org/global-urban-indicators-database>.
- [13] 王桂林,杨昆,杨扬. 京津冀地区不透水表面扩张对PM<sub>2.5</sub>污染的影响研究[J]. 中国环境科学,2017,37(7):2470-2481.
- [14] YAO R, WANG L C, GUI X, et al. Urbanization effects on vegetation and surface urban heat islands in China's Yangtze River Basin[J]. Remote Sensing,2017,9(6):540.
- [15] 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.
- [16] HE C Y, GAO B, HUANG Q X, et al. Environmental degradation in the urban areas of China: evidence from multi-source remote sensing data[J]. Remote Sensing of Environment,2017,193:65-75.
- [17] 徐金鸿,徐瑞松,夏斌,等. 土壤遥感监测研究进展[J]. 水土保持研究,2006,13(2):17-20.
- [18] 国务院关于调整城市规模划分标准的通知:国发〔2014〕51号[EB/OL]. (2014-11-20)[2024-10-02]. [https://www.gov.cn/zhengce/content/2014-11/20/content\\_9225.htm](https://www.gov.cn/zhengce/content/2014-11/20/content_9225.htm).
- [19] LI X C, LIU S R, MA Q W, et al. Impacts of spatial explanatory variables on surface urban heat island intensity between urban and suburban regions in China [J]. International Journal of Digital Earth,2024,17(1):2304074.
- [20] LIU Z F, HE C Y, ZHANG Q F, et al. Extracting the dynamics of urban expansion in China using DMSP-OLS nighttime light data from 1992 to 2008[J]. Landscape and Urban Planning,2012,106(1):62-72.
- [21] HE C Y, LIU Z F, TIAN J, et al. Urban expansion dynamics and natural habitat loss in China: a multiscale landscape perspective[J]. Global Change Biology,2014,20(9):2886-2902.
- [22] XU M, HE C Y, LIU Z F, et al. How did urban land expand in China between 1992 and 2015? A multi-scale landscape analysis [J]. PLoS One,2016,11(5):e0154839.
- [23] WEI J, LI Z Q, LYAPUSTIN A, et al. Reconstructing 1 km-resolution high-quality PM<sub>2.5</sub> data records from 2000 to 2018 in China: spatiotemporal variations and policy implications[J]. Remote Sensing of Environment,2021,252:112136.
- [24] WEI J, LI Z Q, CRIBB M, et al. Improved 1 km resolution PM<sub>2.5</sub> estimates across China using enhanced space-time extremely randomized trees[J]. Atmospheric Chemistry and Physics,2020,20(6):3273-3289.
- [25] National Aeronautics and Space Administration. MYD11A2 MODIS/aqua land surface temperature/emissivity 8-day

- L3 global 1 km SIN grid V006[EB/OL]. [2024-03-25]. <https://lpdaac.usgs.gov/products/myd11a2v006/>.
- [26] National Aeronautics and Space Administration. MOD13A2 MODIS/terra vegetation indices 16-day L3 global 1 km SIN grid [EB/OL]. [2024-03-25]. <https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/missions-and-measurements/products/MOD13A2#product-information>.
- [27] SELLERS P J, TUCKER C J, COLLATZ G J, et al. A revised land surface parameterization (SIB2) for atmospheric GCMS. Part II: the generation of global fields of terrestrial biophysical parameters from satellite data[J]. *Journal of Climate*, 1996, 9(4): 706-737.
- [28] HINKLEY D V. Inference about the change-point in a sequence of random variables[J]. *Biometrika*, 1970, 57(1): 1-17.
- [29] TRUONG C, OUDRE L, VAYATIS N. Selective review of offline change point detection methods [J]. *Signal Processing*, 2020, 167: 107299.
- [30] ZHANG L, HUANG Q X, HE C Y, et al. Assessing the dynamics of sustainability for social-ecological systems based on the adaptive cycle framework: a case study in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2021, 70: 102899.
- [31] CHEN W X, GU T C, ZENG J. Urbanisation and ecosystem health in the Middle Reaches of the Yangtze River urban agglomerations, China: a U-curve relationship[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 318: 115565.
- [32] GU T C, LUO T, YING Z, et al. Coupled relationships between landscape pattern and ecosystem health in response to urbanization[J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 367: 122076.
- [33] 为生态文明建设夯实根基[EB/OL]. (2007-10-29) [2024-10-07]. [http://www.npc.gov.cn/zgrdw/npc/zt/2007-10/29/content\\_374272.htm](http://www.npc.gov.cn/zgrdw/npc/zt/2007-10/29/content_374272.htm).
- [34] 国务院关于印发大气污染防治行动计划的通知:国发〔2013〕37号[EB/OL]. (2013-09-13) [2024-10-02]. [https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2013-09/13/content\\_4561.htm](https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2013-09/13/content_4561.htm).
- [35] 环境保护部关于印发《全国生态保护“十二五”规划》的通知:环发〔2013〕13号[EB/OL]. (2013-01-25) [2024-10-02]. [https://www.gov.cn/gongbao/content/2013/content\\_2396624.htm](https://www.gov.cn/gongbao/content/2013/content_2396624.htm).
- [36] 环保部:“大气十条”成效显著[EB/OL]. (2017-12-02) [2024-10-02]. [https://www.gov.cn/xinwen/2017-12/02/content\\_5244108.htm](https://www.gov.cn/xinwen/2017-12/02/content_5244108.htm).
- [37] 国家林业和草原局. 2020年中国国土绿化状况公报[EB/OL]. (2021-03-11) [2024-10-07]. <https://www.forestry.gov.cn/main/6247/20230131/165308837202511.html>.
- [38] 刘荣增,李盼. 中国城市扩张的环境质量效应研究[J]. *生态经济*, 2021, 37(2): 76-81, 95.
- [39] XU Z C, CHAU S N, CHEN X Z, et al. Assessing progress towards sustainable development over space and time[J]. *Nature*, 2020, 577(7788): 74-78.
- [40] 中国科学院城市环境研究所, 中国科学院生态环境研究中心. 中国东部超大城市群生态环境研究报告 [EB/OL]. (2022-12-27) [2024-10-07]. <https://www.cas.cn/jh/202212/W020221227354703670656.pdf>.
- [41] 让城市更加美好宜居[EB/OL]. [2024-10-04]. <http://www.cppcc.gov.cn/zxww/2024/09/30/ARTI1727667017071192.shtml>.
- [42] 国务院办公厅关于全面推进城镇老旧小区改造工作的指导意见:国办发〔2020〕23号[EB/OL]. (2020-07-20) [2024-10-04]. [https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-07/20/content\\_5528320.htm](https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-07/20/content_5528320.htm).
- [43] 中华人民共和国国土资源部. 全国土地利用总体规划纲要(2006—2020年)[EB/OL]. [2024-10-04]. [https://www.mnr.gov.cn/dt/zb/2008/20081028bstdlyztghxbdsdhhy/beijingziliao/200810/t20081024\\_2131004.html](https://www.mnr.gov.cn/dt/zb/2008/20081028bstdlyztghxbdsdhhy/beijingziliao/200810/t20081024_2131004.html).
- [44] 生态环境部关于印发《生态保护红线生态环境监督办法(试行)》的通知:国环规生态〔2022〕2号[EB/OL]. (2022-12-27) [2024-10-04]. [https://www.gov.cn/gongbao/content/2023/content\\_5741259.htm](https://www.gov.cn/gongbao/content/2023/content_5741259.htm).

(责任编辑:曾礼娜)