
基于 Google Earth Engine 的长江中游城市群城镇化与生态环境耦合协调研究¹

朱翔^{1,2} 王晖³ 吴宜进^{1,2*} 卫思雨^{4,5} 余洋^{1,2}

(1. 华中师范大学地理过程分析与模拟湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430079;

2. 华中师范大学城市与环境科学学院, 湖北 武汉 430079;

3. 湖北安源安全环保科技有限公司, 湖北 武汉 430048;

4. 长江空间信息技术工程有限公司(武汉), 湖北 武汉 430010;

5. 长江卫星遥感应用研究中心, 湖北 武汉 430010)

【摘要】：城市群作为城市发展的最高空间组织形式，在高速城镇化进程中将不可避免地对地区生态环境产生胁迫影响。如何平衡生态环境和城镇化发展已经成为了值得关注的问题。基于 Google Earth Engine 云平台，利用 1995 ~ 2020 年拟合的长时间序列夜间灯光影像数据和 Landsat 影像数据，采用改进的夜间灯光指数和遥感生态指数分别表征城镇化水平和生态环境质量，分析了长江中游城市群城镇化与生态环境的变化特征，同时引入耦合协调发展模型，评价了城镇化水平和生态环境质量之间的耦合协调程度，并分析了其变化特征。研究表明：(1) 长江中游城市群城镇化经历了低水平(1995 ~ 2005 年)—快速发展(2005 ~ 2015 年)—中等水平(2020 年)三个阶段，逐渐形成了以武汉、长沙、南昌为中心向周边辐射发展之势，但区域发展仍存在一定的不均衡现象；(2) 生态环境经历了稳定—下降—恢复三个阶段，整体质量相对较好，变化阶段基本与城镇化吻合；(3) 武汉、长沙、南昌三大中心城市城镇化与生态环境之间快速进入协调状态，并达到中、高度协调，与中心城市紧密相连的周边城市也逐步由失调状态过渡到中度协调状态，同时超过半数的城市长期处于不同程度的失调状态，但总体趋势均在向协调发展，至 2020 年这些城市中仅少数城市仍处于轻度失调状态，其余均达到基本协调状态。

【关键词】：Google Earth Engine；遥感；长江中游城市群；城镇化；生态环境

¹ **【收稿日期】**：2021- 12- 29；**【修回日期】**：2022- 04- 25

【基金项目】：湖北安源安全环保科技有限公司项目(2017052601X)

【作者简介】：朱翔(1991 ~)，男，博士研究生，主要研究方向为地理信息科学与地理过程模拟。E-mail: zhuxiang9109@foxmail. com

* 通讯作者 E-mail: wuyijin@mail. ccnu. edu. cn

随着全球城镇化的不断深入，城市间的联系日益紧密，同时全球范围内的竞争不断加剧，使得当前城市间的发展和竞争不再仅仅局限于单个城市，而越来越多地呈现出以城市群为新的空间单元的竞争发展格局。作为城市发展的最高空间组织形式，城市群依托区域内完善的基础设施网络，有效地将区域内多个城市聚集并形成空间组织紧凑、经济联系密切的城市“集合体”。目前，城市群已成为我国经济高速发展的核心引擎^[1]。城市群是区域经济、城镇化和工业化快速发展的地区，然而，随着城市群经济高速发展、城镇化持续推进，地区人类活动强度不断上升，使得城市群同时成为生态环境压力极大的地区^[2,3]。城镇化与生态环境之间客观上存在极其复杂的交互耦合关系^[4]，城镇化是社会经济发展的必然趋势，生态环境是社会和人类赖以生存发展的自然基础^[5]，生态环境的好坏制约着城市的发展，而快速的城镇化过程又将对生态环境造成威胁。因此，在当前城镇化不断推进过程中，生态环境退化问题日益突出的背景下，如何协调这两者之间的关系已成为世界性战略问题^[6]。

城镇化与生态环境的相互作用、交互耦合关系，引起了众多学者的广泛关注与研究。方创琳等^[7]从理论层面分析了城镇化与生态环境的交互耦合关系，并构建了耦合调控器。刘海猛等^[8]从空间、时间、表象和组织四个维度，提出了用于解释城镇化与生态环境耦合机理的“耦合魔方”概念。刘巧婧^[9]、马艳^[10]、吕有金^[11]等基于统计面板数据，分别从不同尺度对城镇化与生态环境系统耦合协调进行测度分析。凌立文^[12]、孙斌^[13]等采用不同模型对未来城镇化与生态环境耦合协调度进行预测。He Su 等^[14]通过数据挖掘分析了城镇化与生态环境协调发展的影响因素。上述城镇化和生态环境的耦合协调分析多基于面板统计数据，而随着遥感技术的发展以及计算机处理水平的提高，为地区城镇化和生态环境监测、评估提供了新的技术支撑。遥感技术具有覆盖面广、空间和时间尺度多样、光谱信息丰富、观测灵活及数据获取方便等优势，在一定程度上有利于城镇化与生态环境研究的进一步细化。一方面，DMSP-OLS、NPP-VIIRS 等夜间灯光数据为城镇化的研究开启了新的大门，现有学者在利用夜间灯光数据提取城镇范围^[15,16,17]以及测度城镇化水平^[18,19]等方面已有较多实证研究，均认为夜间灯光数据能较好的表征城镇化与城市扩张，但夜间灯光前后两种数据的不兼容在一定程度上限制了长时间尺度的研究。另一方面，由徐涵秋提出的完全基于遥感技术，集成多种指标因素构建的遥感生态指数 (RESI)^[20]，能够快速测度区域综合生态环境，得到了很好的应用^[21,22,23]，尤其对于研究区时间、空间跨度大，无法或难以获得完整统计数据的情况，起到很好的弥补和替代作用^[24]。

长江中游城市群承东启西、连南接北，是长江经济带的重要组成部分，也是实施促进中部地区崛起战略、全方位深化改革开放和推进新型城镇化的重点区域，在我国区域发展格局中占有重要地位。在注重生态环境保护的前提下，保持长江中游城市群高速度、高质量推进城镇化发展，实现经济发展与环境协调是当前城市群建设中亟需解决的关键问题。因此，选择长江中游城市群为研究区，基于 Google Earth Engine 平台，采用拟合后的 1995~2020 年的夜间灯光数据和 Landsat 数据，分别构建改进的灯光指数与遥感生态指数，表征城镇化和生态环境的水平并分析其变化特征，借助耦合协调度模型定量测度城镇化与生态环境的耦合协调度，以期能为长江中游城市群城镇化与生态环境协调发展目标的实现提供科学有效的数据支撑和理论依据。

1 研究区概况与数据处理

1.1 研究区概况

长江中游城市群，又称“中三角”，是以武汉为中心，以武汉城市圈、环长株潭城市群、环鄱阳湖城市群为主体形成的特大型国家级城市群，规划范围包括：湖北省武汉市、黄石市、鄂州市、黄冈市、孝感市、咸宁市、仙桃市、潜江市、天门市、襄阳市、宜昌市、荆州市、荆门市，湖南省长沙市、株洲市、湘潭市、岳阳市、益阳市、常德市、衡阳市、娄底市，江西省南昌市、九江市、景德镇市、鹰潭市、新余市、宜春市、萍乡市、上饶市及抚州市、吉安市的部分县区(其中仙桃市、潜江市、天门市 3 个属于湖北省直辖的县级市，为了对比的合理性，将这 3 个城市合称“湖北直辖县”进行研究)。

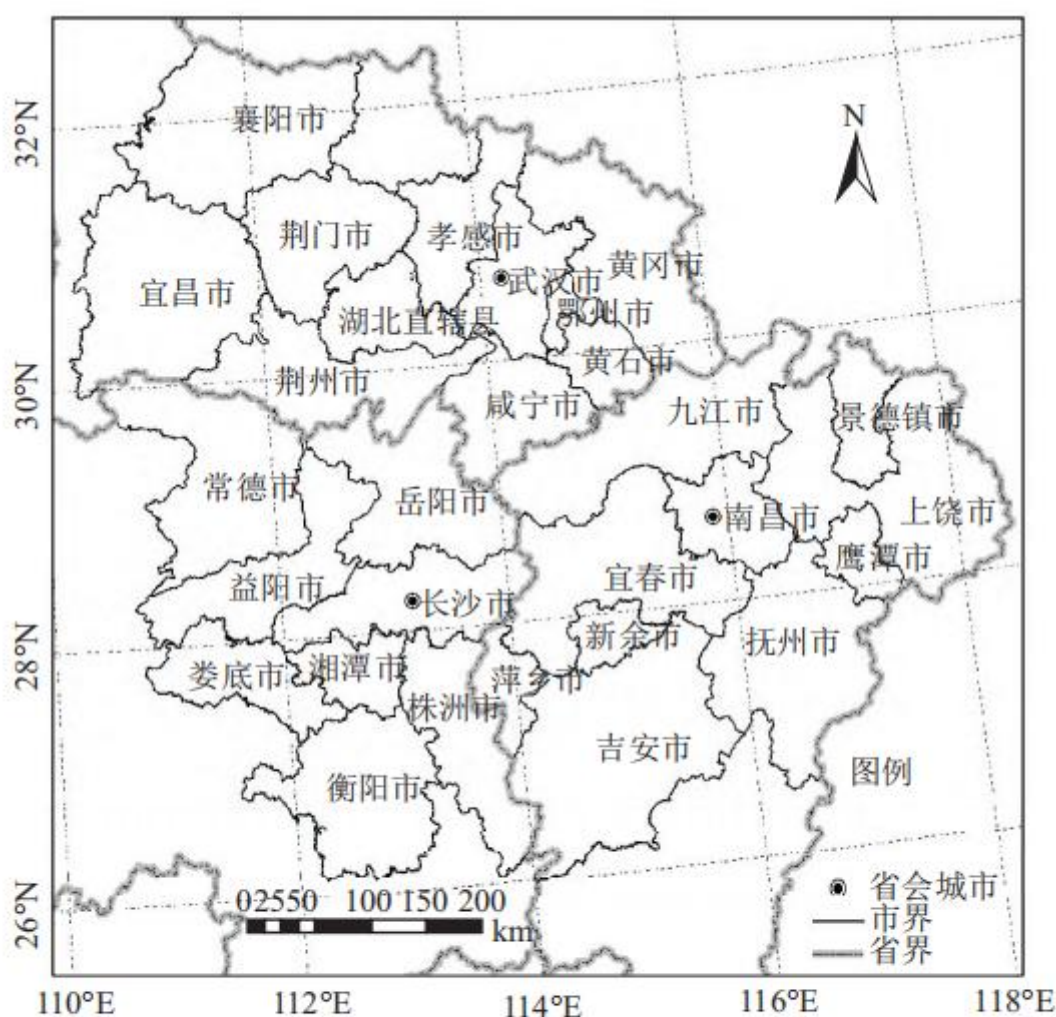


Fig. 1 Location map of urban agglomeration in middle reaches of Yangtze River

1.2 数据来源及预处理

//ngdc.noaa.gov/eog/download.html), 时间跨度为 1992~2013 年, 是经过滤除云、火光等的偶然噪声后进行平均化处理得到的稳定灯光影像, 取值范围为 0~63。由于 DMSP 没有安装校正设施、卫星过境时间不同以及传感器老化, 导致该数据集出现了同一年份不同卫星数据的不可比, 同一卫星不同年份数据波动太大以及出现非正常下降等问题。因此, 在利用数据之前, 需要对 DMSP 数据进行相互校正、年内融合和年际间校正^[25,26], 使不同年份、不同卫星之间的数据具有可比性。NPP/VIIRS 夜间灯光数据, 来源于美国科罗拉多矿业大学地球观测组 (EOG) (<https://eogdata.mines.edu/products/vnl/>), 时间跨度为 2012 年至今, 其第二版数据在月度数据的基础上进一步过滤了生物质燃烧, 极光和背景噪声等无关特征, 合成了年度数据^[27]。但是该数据未对气体燃烧像元进行处理, 气体燃烧是所有地球表面光源中亮度最高的^[28], 还需要对 VIIRS 数据进一步处理, 选取阈值 472.86 去除气体燃烧像元, 并去除像元值为负值的单元格^[29]。由于两套灯光数据有着本质上的区别和不可兼容性, 在进行长时间序列研究时, 需要对两套数据进行融合, 基于两套数据相重合的 2012~2013 年部分, 将 VIIRS 数据降维拟合成 DMSP 数据^[29,30,31]。

Landsat 数据包括 Landsat5(TM) 和 Landsat8(OLI) 地表反射率数据产品 (Surface Reflectance), 来源于美国地质调查局 (<http://glovis.usgs.gov>), 该数据产品第二版已经过几何校正、辐射校正和大气校正, 数据精确性较高, 可以直接使用, 选取数据季相相同, 保证自然下垫面要素状态相似, 使研究具有可比性。

第一次地理国情普查数据来源于各省市地理国情普查公报, 包括地形地貌、植被覆盖、水域、荒漠与裸露地等自然地理要素的基本情况, 其他统计数据来源于中国城市统计年鉴。

1.3 数据处理平台

Google Earth Engine(GEE)是一个基于云的行星级地理空间分析平台, 它利用 Google 的强大计算能力能够在线处理分析大量全球尺度地球科学资料(尤其是卫星数据)并进行可视化, 以应对各种社会、环境问题^[32]。GEE 在云端服务器上存储了 PB 级别的空间数据, 包括了超过 200 个公共数据集, 超过 500 万张影像, 每天都有约 4 000 多张影像从正在执行的卫星任务中扩充。得益于 GEE 强大算力和云端数据存储的特征, 近年来, 基于 GEE 平台的大尺度环境监测研究正在不断开展^[33,34,35]。由于研究涉及 31 个城市 25 年的生态环境和城镇化特征提取分析, 使用传统本地方案在数据获取和预处理上将耗费大量的时间和精力, 因此将数据预处理与指数计算工作部署到 GEE 平台。

2 研究方法

2.1 夜间灯光指数

为使夜间灯光数据能够定量地表示各地城镇化水平, 陈晋、卓莉等人提出并改进了反映区域城镇化水平的灯光指数 CNLI^[36,37]。公式如下:

$$CNLI = I \times S \quad (1)$$

$$I = \frac{\sum (DN_i \times n_i)}{N_L \times DN_M} \quad (2)$$

$$S = \frac{Area_L}{Area} \quad (3)$$

式中：I 表示区域内灯光像元的平均相对强度；S 表示灯光像元面积与区域总面积之比；DN_i 表示区域内第 i 级像元灰度值；n_i 为区域内该灰度值像元总数；N_L 为灯光像元总数；DN_M 为最大可能灰度值；Area_L 为灯光像元占据面积；Area 为整个区域面积。

运用该方法得到的灯光指数在省级尺度上与城镇化水平显著相关，能够较好地反映城镇化水平，但在县级尺度上的相关系数明显低于省级，说明该方法在省级以下尺度对城镇化水平的度量不够准确。从其公式易知，CNLI 指数实际上是指该地区内灯光像元总亮度值与最大可能总亮度值之比。在计算最大可能总亮度时是按的地区总面积计算，而各地区总面积往往差异较大，这就可能导致同样的城镇规模，总面积大的地区城镇化水平被低估，实际上受地形地貌限制，长江中游地区多山林、湖泊，不具备城镇化的条件，在计算最大可能亮度时应剔除这部分面积，因此引入系数 p 对其进行修正，本研究选择森林覆盖率与水面面积率之和作为 P 值，数据来源于第一次地理国情普查数据，则修正后的公式为：

$$CNLI = I \times S \quad (4)$$

$$I = \frac{\sum (DN_i \times n_i)}{N_L \times DN_M} \quad (5)$$

$$S = \frac{Area_L}{(1 - P)Area} \quad (6)$$

为了验证改进后的夜间灯光指数的有效性，选取与原方法一致的统计数据指标构建城镇化水平指数，分别与改进前后的夜间灯光指数进行相关性分析，结果显示均通过了 0.01 的显著性水平检验，且改进后的夜间灯光指数与城镇化水平指数的相关系数为 0.839, 大于原始方法的 0.783, 说明改进的夜间灯光指数在长江中游城市群市级尺度研究上更适用。

2.2 遥感生态指数

中国生态环境部于 2015 年发布了《生态环境状况评价技术规范》(HJ 192-2015), 该规范的生态环境指数(EI)包括生物丰富度、植被覆盖度、水网密度、土地胁迫度和污染负荷等五个评价指标。通过遥感可以很容易地获得生物丰富度、植被覆盖度和水网密度等指标，但后两个指标难以通过遥感直接获得。此外，这五个指标的权重是由人决定的，具有一定的主观偏差。而由徐涵秋等人^[20]提出的遥感生态指数(RSEI)应用了绿度、湿度、干度和热度 4 个指标来表征生态环境特征，利用主成分分析，可以避免人为权重带来的主观偏差。其中绿度与植被覆盖率相似，且与生物丰富度高度相关；湿度与水网密度相关，且还可以代表植被和土壤的湿度；干度与土地退化有关，代表干度的裸土指数越高，土地退化越严重；热度与城市扩张、工业生产和其他环境变化有关，在一定程度上可以表征环境热污染。因此遥感生态指数(RSEI)与《规范》中的生态环境指数(EI)具有较强的可比性。

由于 4 个指标的量纲不统一，如果直接用其计算 PCA, 会导致各指标的权重失衡，因此在做主成分变换前，必须先对这些指标进行正规化，将它们的量纲统一到[0, 1]之间，然后再计算 PCA。各指标的正规化公式为：

$$NI_i = (I - I_{\min}) / (I_{\max} - I_{\min}) \quad (7)$$

式中： NI_i 为正规化后的某一指标值； I_i 为该指标在象元 i 的值； $I_{\max}$ 为该指标的最大值； $I_{\min}$ 为该指标的最小值。

经过正规化后的 4 个指标就可以用于计算 PC1。为使 PC1 大的数值代表好的生态条件，可进一步用 1 减去 PC1，获得初始的遥感生态指数 RSEIO：

$$RSEIO = 1 - \{ PC1[F(NDVI, WET, LST, NDBSI)] \} \quad (8)$$

为了便于指标的度量和比较，可同样对 RSEIO 进行正规化：

$$RSEI = (RSEIO - RSEIO_{\min}) / (RSEIO_{\max} - RSEIO_{\min}) \quad (9)$$

RSEI 即为所建的遥感生态指数，其值介于[0, 1]之间。RSEI 值越接近 1, 生态越好，反之，生态越差。

2.3 耦合协调度模型

耦合的概念来自于物理学中的容量耦合，是指两个或两个以上系统或运动形式通过各种相互作用而彼此影响的现象，耦合度就是描述系统或要素相互影响的程度^[38]。城镇化与生态环境的耦合协调度模型由耦合度模型和协调度模型两部分组成。首先引入耦合度模型，公式如下：

$$C = \frac{f^k(U) \times g^k(E)}{\left[\frac{f(U) + g(E)}{2} \right]^{2k}} \quad (10)$$

式中： $f(U)$ 表示城镇化系统的综合发展水平； $g(E)$ 表示生态环境系统的综合发展水平； k 是调节因子， k 值一般取 $2^{[39]}$ 。 C 为城镇化与生态环境系统的耦合值， $0 \leq C \leq 1$ ，值越大表示耦合度越高。

如果仅使用耦合度模型，可能出现两个子系统的发展水平却都很低，但系统耦合度较高的情况，表现为“假协调”现象。为了避免这种情况，需要考虑系统发展水平，进一步引入协调度模型，以此客观地反映城镇化水平系统与生态环境系统协调发展水平，公式如下：

$$T = \alpha f(U) + \beta g(E) \quad (11)$$

$$D = \sqrt{C \times T} \quad (12)$$

式中：T 是城镇化和生态环境系统的综合水平， α 和 β 分别为城镇化与生态环境水平的贡献度， $\alpha + \beta = 1$ ，由于二者在耦合系统中地位同等重要，因此取 $\alpha = \beta = 0.5^{[40]}$ 。D 是城镇化与生态环境系统的耦合协调度， $0 \leq D \leq 1$ ，值越大表示系统协调度越高。

结合耦合协调度结果，将城镇化与生态环境耦合度和协调度分别划分为四类和五类，分类等级标准如表 1、表 2 所示。

表 1 城镇化与生态环境耦合度分类标准

耦合度 C	等级	耦合阶段
0~0.3	I	低水平耦合阶段
0.3~0.5	II	拮抗阶段
0.5~0.8	III	磨合阶段
0.8~1.0	IV	高水平耦合阶段

表 2 城镇化与生态环境协调度分类标准

协调度 D	等级	协调程度
0~0.2	I	严重失调
0.2~0.4	II	中等失调
0.4~0.5	III	基本协调
0.5~0.8	IV	中度协调
0.8~1.0	V	高度协调

3 结果与分析

3.1 城镇化发展状况

根据公式，按市级行政区计算各年度夜间灯光指数。从总体水平上看(表 3)，1995~2020 年长江中游城市群城镇化水平快速升高，平均夜间灯光指数由 1995 年的 0.061 上升至 2020 年的 0.274，且 2010 年之后的城镇化进程速度明显高于 1995~2010 年。从各年份的最值可以看出，长江中游城市群夜间灯光指数的最大值与最小值之差很大，即城镇化存在较大地区差异，地区间发展不均衡，且差距呈现不断扩大的态势；但从最值的增长速度来看，最小值的增长速度要明显高于最大值的增长速度，说明城镇化水平相对较低的地区同样有较高的发展速度，目前发展不均衡的主要原因是基础水平差异巨大。从省级单元尺度来看(图 2)，

湖北省城镇化水平最高，但与湖南省和江西省差距较小，三省整体发展趋势较为一致，因此地区间发展的不均衡主要来自于各省内。

表 3 1995~2020 年长江中游城市群夜间灯光指数

年份	最大值	最小值	平均夜间灯光指数
1995	0.213	0.013	0.061
2000	0.254	0.019	0.071
2005	0.352	0.036	0.123
2010	0.424	0.041	0.144
2015	0.577	0.062	0.195
2020	0.826	0.097	0.274

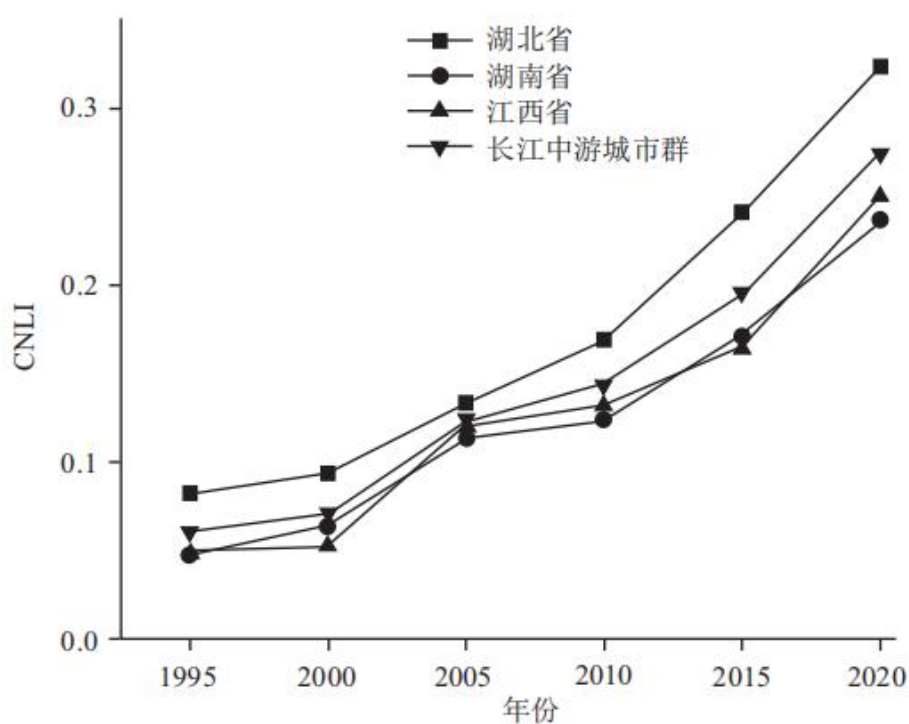


图 2 1995~2020 年长江中游城市群
各省夜间灯光指数均值

Fig. 2 Average value of night light index of each province in
middle reaches of Yangtze River from 1995 to 2020

从空间结构上来看(图 3),1995 年长江中游城市群城镇化水平总体上较低,灯光指数在 0.1 以上的只有武汉市、鄂州市及黄石市,都在湖北省内,且依托武汉市为中心发展。在 2005~2010 年间逐渐开始形成以武汉市、长沙市和南昌市为中心的城市圈,但这一阶段三省内的地区间差异也在逐渐拉开,中心城市的快速发展对边缘城市的带动有限,仍有半数左右的城市灯光指数未达到 0.1 以上。2010 年以后,长江中游城市群整体城镇化水平大幅度提升,大致呈现由中心城市向边缘城市辐射发展的格局。到 2020 年,除吉安市外,所有城市夜间灯光指数均大于 0.1,总体达到中等水平,3 个中心城市武汉、长沙和南昌夜间灯光指数分别达到 0.721、0.525、0.441,处于较高城镇化水平,对周边城市的辐射带动能力不断提升。

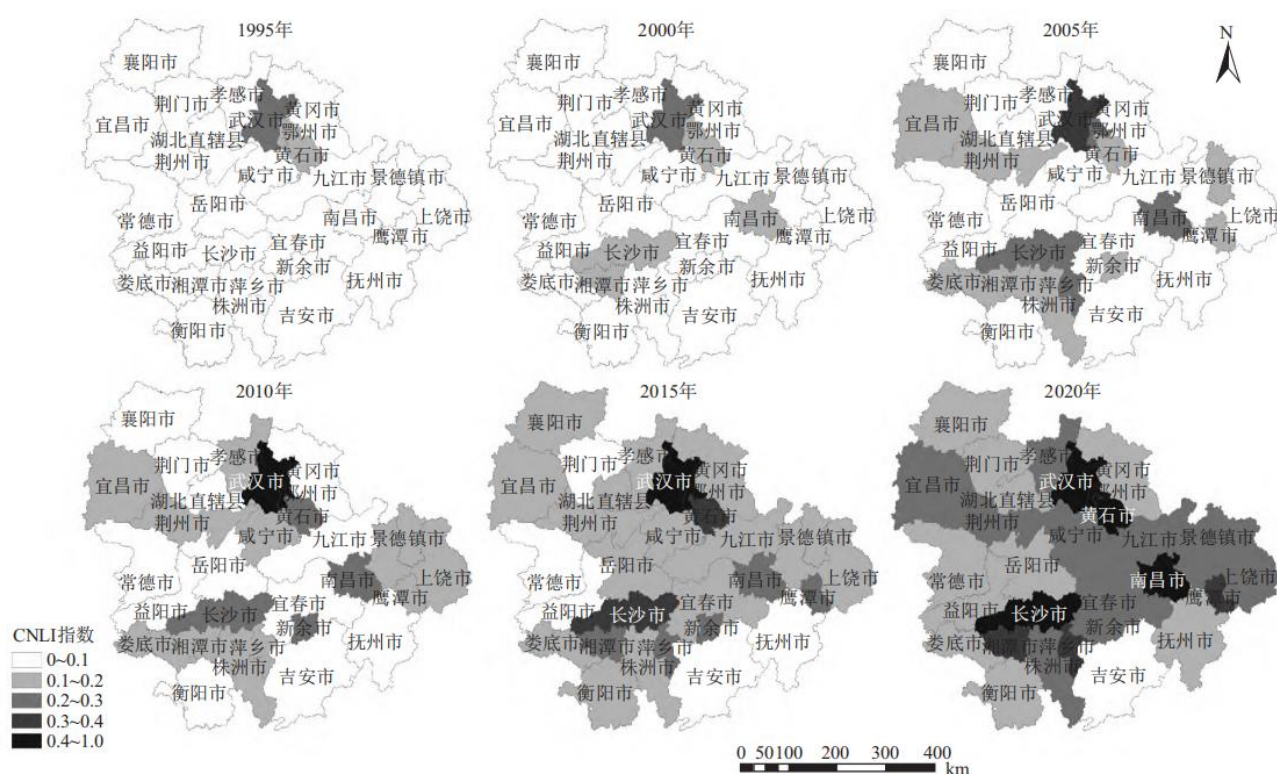


图 3 1995~2020 年长江中游城市群城镇化水平

Fig. 3 Urbanization level of urban agglomerations in middle reaches of Yangtze River from 1995 to 2020

3.2 生态环境发展状况

根据公式提取绿度、湿度、干度和热度 4 个指标,正规化处理之后进行主成分分析,结果显示,所选 6 个年份的第一主成分的特征值贡献率分别为:97.52%、97.92%、98.91%、98.22%、97.18%、97.97%,表明第一主成分已集中了 4 个指标的绝大部分信息,可以用于创建遥感生态指数,计算结果如图 4。

按市级行政区统计长江中游城市群遥感生态指数如表 4。从总体上来看,1995~2020 年长江中游城市群平均遥感生态指数在 0.750~0.850 之间,属于较高水平,年度平均指数变化量在 0.10 以内,说明生态环境质量总体较好且较为稳定。但值得注意的是在 2010~2015 年,平均遥感生态指数在所有年份中处于较低水平,2010 年和 2015 年相较 2005 年分别下降了 8.8% 和 11.2%,表明在此期间生态环境受到一定程度的破坏,虽然到 2020 年有较好的改善,但仍未达到 2005 年以前的水平。从最值来看,2010 年最值之差最大,接近 0.2,主要是由于最小值变低,说明该年度部分地区生态环境质量有所下降,其余年份最值之差均在 0.1 左右,说明地区间生态环境整体水平差异较小。从省级单元尺度来看(图 5),长江中游三省平均遥感指数之间差异较小,湖南省略高于平均水平,湖北省略低于平均水平,江西省基本与平均水平持平,且三省变化趋势基本一致。

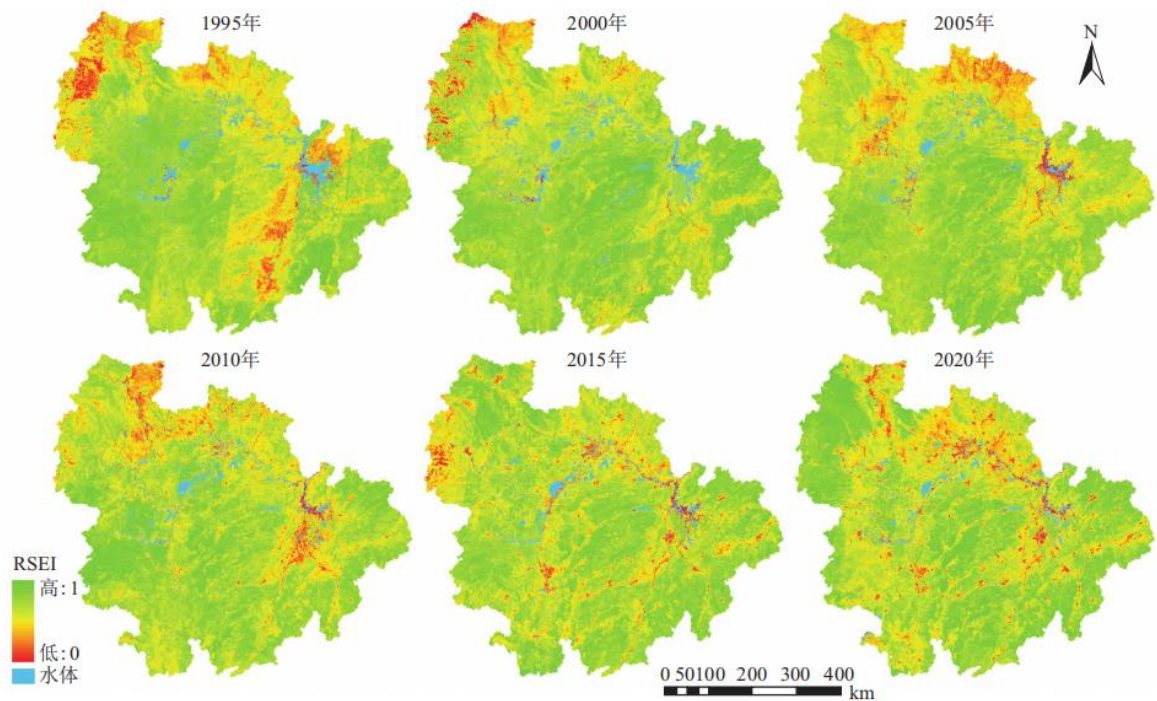


图 4 1995~2020 年长江中游城市群遥感生态指数

Fig. 4 Remote sensing ecological index of urban agglomeration in middle reaches of Yangtze River from 1995 to 2020

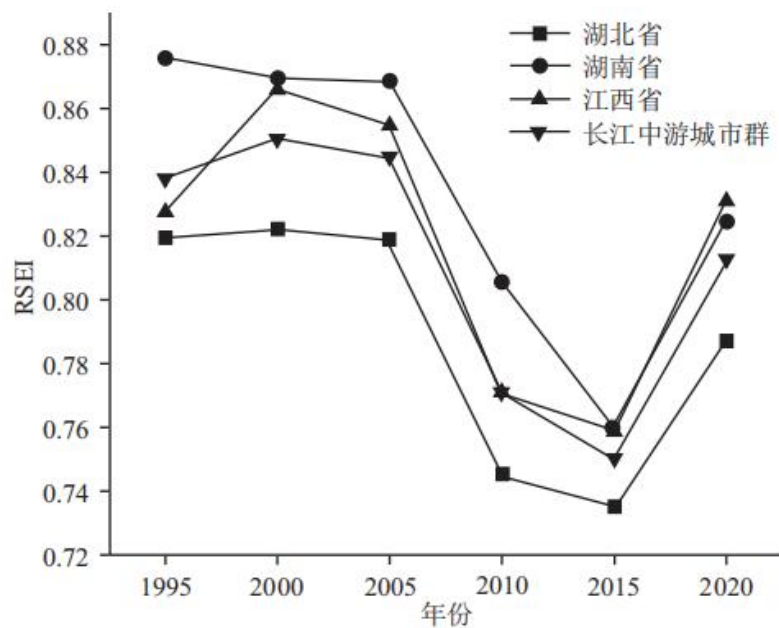


图 5 1995~2020 年长江中游城市群
各省遥感生态指数均值

Fig. 5 Average value of remote sensing ecological index
of each province in middle reaches of
Yangtze River from 1995 to 2020

表 4 1995~2020 年长江中游城市群遥感生态指数

年份	最大值	最小值	平均遥感生态指数
1995	0.899	0.759	0.838
2000	0.884	0.789	0.850
2005	0.888	0.769	0.845
2010	0.843	0.668	0.771
2015	0.789	0.698	0.750
2020	0.860	0.743	0.813

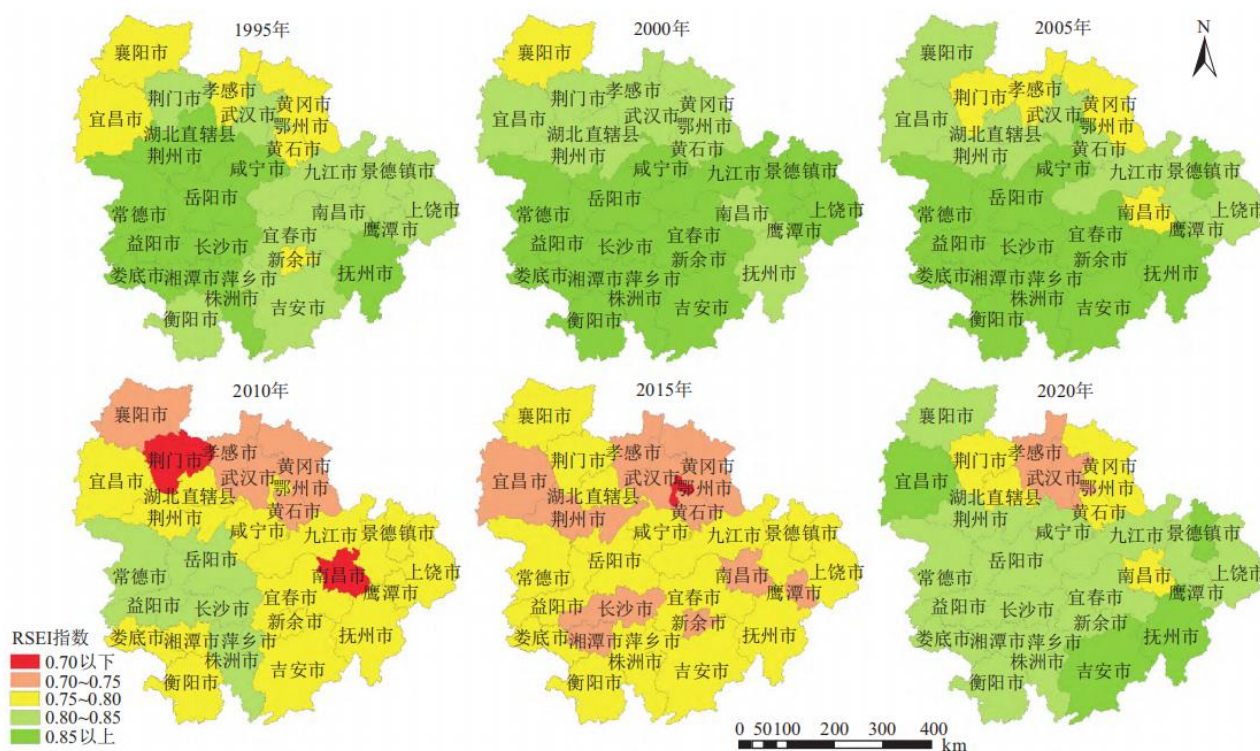


图 6 1995~2020 年长江中游城市群生态环境水平

Fig. 6 Ecological environment level of urban agglomeration in middle reaches of Yangtze River from 1995 to 2020

从空间结构上来看, 1995~2005 年长江中游城市群整体生态环境质量较好且变化较小, 仅湖北省北部少数城市处于中等水平, 总体呈现南部略好于北部的格局, 期间江西省生态环境还有小幅度提升。但到 2010~2015 年, 整个长江中游城市群呈现了较为明显的生态环境质量下滑, 下滑比例约 10%, 总体处于中等及以下水平, 生态环境压力主要集中在北部。这一情况到 2020 年得到好转, 绝大部分城市的生态环境恢复到较好水平, 但北部仍有部分城市处于中等及以下水平, 值得注意的整个长江中城市群生态环境仍未恢复到 2010 年以前的水平。

结合城镇化发展历程发现, 生态环境发生明显下降的 2010~2015 年, 也是城镇化高速发展的时期, 快速的城镇化不可避免

地对生态环境产生了一定的破坏，这一阶段生态环境的格局基本与城镇化水平相反，即城镇化水平越高的地区生态环境越差，主要的生态压力集中在武汉、长沙和南昌三大中心城市周边。随着人们环境保护意识的提高，通过一系列政策调控，到2020年生态环境质量得以恢复，但城镇化水平最高的武汉市周边仍存在一定生态压力有待进一步改善。

3.3 城镇化与生态环境耦合特征分析

从耦合度C值来看(图7), 1995~2020年长江中游城市群城镇化与生态环境耦合度整体水平较低，其中多数城市在大部分年份中处于低水平耦合阶段，但均呈逐年上升之势，正在由低水平耦合阶段逐渐过渡到“拮抗-磨合”阶段。特别是2010年以后，低水平耦合城市数量明显开始变少，到2020年仅有少数城市仍处于低水平耦合阶段，绝大部分城市进入“拮抗-磨合”阶段，少数城市甚至达到高水平耦合阶段。对各城市变化趋势进行聚类，大致可分为四类：第一类在研究期初期就已基本脱离低水平耦合阶段，并快速转变进入高水平耦合阶段；第二类在研究期初期处于低水平耦合阶段，中期逐渐过渡到拮抗阶段，末期基本进入磨合阶段；第三类研究期初期处于低水平耦合阶段，末期进入拮抗阶段；第四类研究期内长期并仍处于低水平耦合阶段。

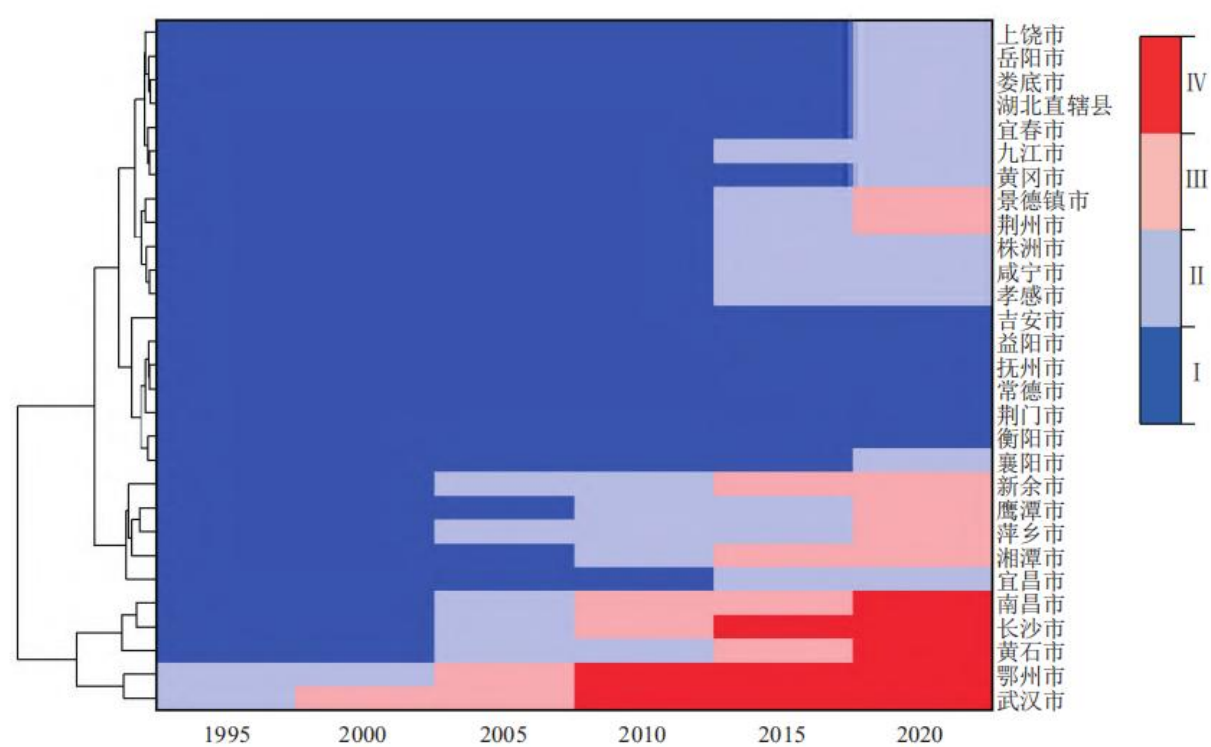


图7 长江中游城市群城镇化与生态环境耦合度等级聚类

Fig. 7 Level and clustering of urbanization and ecological environment coupling degree of urban agglomeration in middle reaches of Yangtze River

从协调度D值来看(图8), 1995~2020年长江中游城市群大部分城市的城镇化与生态环境之间长期处于不同程度的失调状态，但总体趋势在向协调发展，其中严重失调的城市数量到2010年已是少数，到2015年基本消失，至2020年绝大部分城市已经进入协调状态，接近半数的城市达到中等以上协调状态。对各城市变化趋势进行聚类，同样可分为四类：第一类，在研究期初期处于中等失调至基本协调状态，随后在中期快速进入中等协调状态，至末期已基本达到或接近高度协调状态；第二类，在研究期初期处于不同程度的失调状态，上升较为平稳，在中后期进入基本协调状态，末期到达中等协调状态；第三类在研究期初期处于严重失调状态，转变相对较慢，中期仍处于中等失调状态，末期达到基本协调状态；第四类，研究期内均处于失调状态，

但失调程度逐步减轻,由前中期的严重失调转变至末期的中等失调状态。

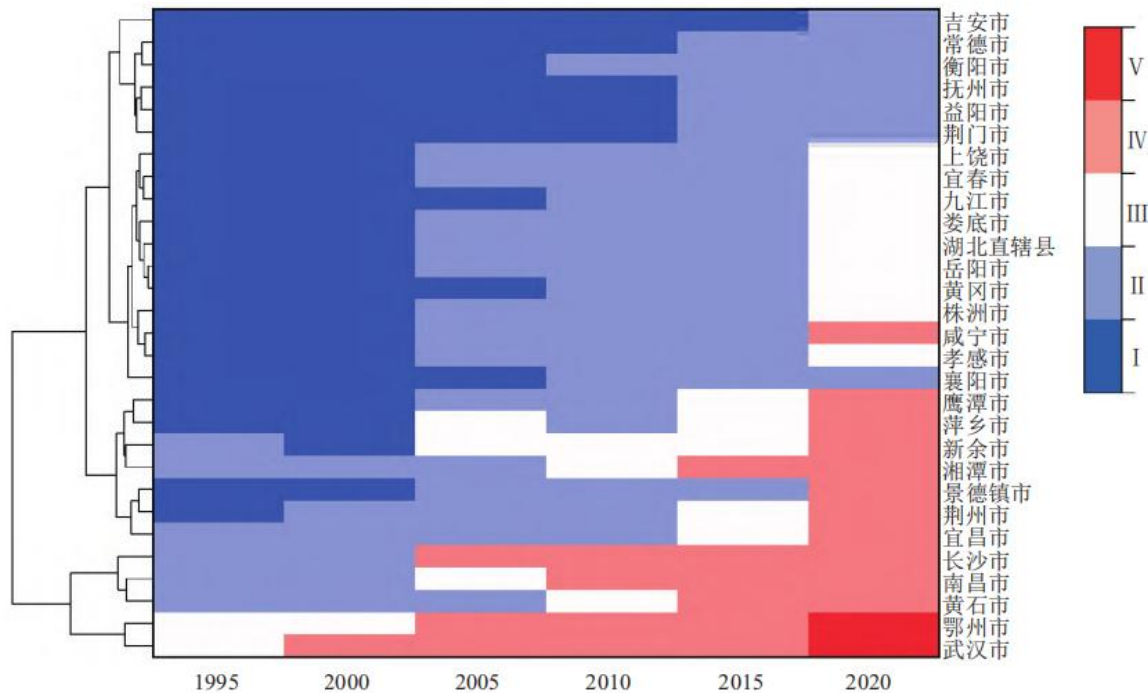


图 8 长江中游城市群城镇化与生态环境协调度等级聚类

Fig. 8 Level and clustering of coordination degree between urbanization and ecological environment in urban agglomeration of middle reaches of Yangtze River

对比发现耦合度和协调度在变化趋势上高度相似，各城市均呈现不同程度的上升趋势，说明城镇化和生态环境两个系统趋于耦合，两系统水平差距不断减小，且两系统综合水平不断提高。耦合度和协调度聚类结果基本一致，可分为四类，第一类和第二类主要是三大中心城市及与之紧密联系的周边城市，在中心城市的带动下，较快地进入协调状态，第三类和第三类主要是远离中心的边缘城市，受中心城市带动有限，进入协调状态较慢，其中第四类尚未进入协调状态。

在空间结构上协调度与城镇化水平有较高的一致性，而与生态环境水平相关度较低，其原因在于城镇化经历了低水平—快速发展—较高水平三个阶段，变化幅度大，而生态环境总体保持较高水平，两系统呈现城镇化水平追赶生态环境水平的状态，因此城镇化水平快速提高显著提升了协调度。但另一方面生态环境对协调度的影响同样不可忽视，在生态环境水平下降的时期，绝大部分城市的协调度上升幅度变缓，部分城市的协调度甚至出现了下降，其影响在城镇化快速发展时期容易被掩盖，若不加重重视，当城镇化发展到一定程度趋于平稳后将会显著暴露出来并影响城市协调。因此，在当前进行城镇化建设这一首要任务的同时需要兼顾生态环境保护，及时发现问题并制定策略，最终走向城镇化与生态环境和谐发展的道路。

4 结论

(1)长江中游城市群城镇化水平变化较大,经历了3个阶段,1995~2005年整体处于低水平阶段,2005~2015年处于高速发展阶段,形成了以武汉、长沙、南昌为中心的城市圈,并向周边辐射发展之势,2020年总体达到中等水平,三大中心城市达到较高水平,但区域内仍存在一定的不平衡现象。

(2) 长江中游城市群生态环境质量相对稳定, 1995~2005 年整体处于较高水平, 在 2010~2015 年受快速城镇化影响下降了约 10%, 生态压力主要集中在城镇化水平最高的三大中心城市周边, 到 2020 年有所恢复但仍未达到 2005 年以前的水平。

(3) 长江中游城市群耦合协调度除少数城市快速进入协调状态外, 绝大部分城市长期处于不同程度的失调状态, 但总体趋势在向协调发展, 1995~2000 年以严重失调为主, 2005~2015 年以轻度失调为主, 至 2020 年绝大部分城市已经进入协调状态, 接近半数的城市达到中等以上协调状态。其中三大中心城市及与之紧密联系的周边城市, 在中心城市的带动下, 较快地进入协调状态, 而远离中心的城市, 进入协调状态较慢, 中心城市的辐射带动能力有待提升。

参考文献

- [1] 张国俊, 王珏晗, 吴坤津, 等. 中国三大城市群经济与环境协调度时空特征及影响因素[J]. 地理研究, 2020, 39(2):272-288. ZHANG G J, WANG J H, WU K J, et al. Spatial-temporal characteristics and influencing factors of coordination between economic and environmental development of three major urban agglomerations in China[J]. Geographical Research, 2020, 39(2):272-288.
- [2] GAO X L, XU Z N, NIU F Q, et al. An evaluation of China's urban agglomeration development from the spatial perspective[J]. Spatial Statistics, 2017, 21:475-491.
- [3] JIANG W, CHEN Z, LEI X, et al. Simulation of urban agglomeration ecosystem spatial distributions under different scenarios: A case study of the Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration[J]. Ecological Engineering, 2016, 88:112-121.
- [4] 王少剑, 方创琳, 王洋. 京津冀地区城市化与生态环境交互耦合关系定量测度[J]. 生态学报, 2015, 35(7):2244-2254. WANG S J, FANG C L, WANG Y. Quantitative investigation of the interactive coupling relationship between urbanization and eco-environment[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(7):2244-2254.
- [5] 白俊燕, 卫海燕, 路春燕, 等. 渭南市城市化水平和生态环境压力关系研究[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(12):28-32. BAI J Y, WEI H Y, LU C Y, et al. The relationship between urbanization level and urban ecological environmental pressure of Weinan[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2012, 26(12):28-32.
- [6] FANG C, LIU H, LI G. International progress and evaluation on interactive coupling effects between urbanization and the eco-environment[J]. Journal of Geographical Sciences, 2016, 26(8):1081-1116.
- [7] 方创琳, 崔学刚, 梁龙武. 城镇化与生态环境耦合圈理论及耦合器调控[J]. 地理学报, 2019, 74(12):2529-2546. FANG C L, CUI X G, LIANG L W. Theoretical analysis of urbanization and eco-environment coupling coil and coupler control[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(12):2529-2546.
- [8] 刘海猛, 方创琳, 李咏红. 城镇化与生态环境“耦合魔方”的基本概念及框架[J]. 地理学报, 2019, 74(8):1489-1507. LIU H M, FANG C L, LI Y H. The Coupled Human and Natural Cube: A conceptual framework for analyzing urbanization and eco-environment interactions[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(8):1489-1507.
- [9] 刘巧婧, 王莉红. 城市化与生态环境耦合协调关系研究——以杭州市为例[J]. 环境科学学报, 2018, 38(10):4214-4222. LIU Q J, WANG L H. Examination of a coupling coordination relationship between urbanization and the eco-environment: Case study of Hangzhou[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, 38(10):4214-4222.
- [10] 马艳. 长江经济带城镇化与生态环境耦合协调效应测度与交互胁迫关系验证[J]. 长江流域资源与环境,

2020, 29(2):275-286. MA Y. Examining the coupling degree and interactive stress between urbanization and eco-environment in Yangtze River economic belt[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2020, 29(2):275-286.

[11] 吕有金, 孔令池, 李言. 中国城镇化与生态环境耦合协调度测度[J]. 城市问题, 2019(12):13-22. LV Y J, KONG L C, LI Y. Measurement on the coordination degree of China's urbanization and ecological environment[J]. Urban Problems, 2019(12):13-22.

[12] 凌立文, 余平祥. 广东省城镇化与生态环境耦合水平分析与预测[J]. 西北农林科技大学学报(社会科学版), 2016, 16(4):138-145, 154. LING L W, YU P X. Analysis and prediction of coupled coordination level of urbanization and eco-environment in Guangdong Province[J]. Journal of Northwest A&F University (Social Science Edition), 2016, 16(4):138-145, 154.

[13] 孙斌, 徐渭, 薛建春, 等. 黄河流域城市群城镇化与生态环境耦合协调预测[J]. 地球科学与环境学报, 2021, 43(5):887-896. SUN B, XU W, XUE J C, et al. Prediction of coupling and coordination between urbanization and eco-environment of urban agglomerations in Yellow River Basin, China[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2021, 43(5):887-896.

[14] HE S, LUO D, GUO K. Analysis of factors affecting the coordinated development of urbanization and the ecological resource environment in southwest China based on data mining[J]. Journal of Urban Planning and Development, 2021, 147(3):04021034.

[15] 王利伟, 冯长春. 转型期京津冀城市群空间扩展格局及其动力机制——基于夜间灯光数据方法[J]. 地理学报, 2016, 71(12):2155-2169. WANG L W, FENG C C. Spatial expansion pattern and its driving dynamics of Beijing-Tianjin-Hebei metropolitan region: Based on nighttime light data[J]. Acta Geographica Sinica, 2016, 71(12):2155-2169.

[16] SUDALAYANDI R S, SRINIVASAN E, KASARAGOD G R. Urban growth analysis of Tamil Nadu state, India using VIIRS DNB night data during 2012 and 2016[J]. Remote Sensing Applications: Society and Environment, 2021, 23:100559.

[17] ZHANG B, LI J, WANG M, et al. Using DMSP/OLS and NPP/VIIRS images to analyze the expansion of 21 urban agglomerations in China's mainland[J]. Journal of Urban Planning and Development, 2021, 147(3):04021024.

[18] 杨洋, 黄庆旭, 章立玲. 基于 DMSP/OLS 夜间灯光数据的土地城镇化水平时空测度研究——以环渤海地区为例[J]. 经济地理, 2015, 35(2):141-148, 168. YANG Y, HUANG Q X, ZHANG L L. The spatial-temporal measurement on the land urbanization level using DMSP/OLS nighttime light data—a case study of Bohai rim[J]. Economic Geography, 2015, 35(2):141-148, 168.

[19] 孙阳, 刘新, 苏亚聪, 等. 基于夜间灯光数据估算安徽省县级尺度城镇化水平[J]. 地球信息科学学报, 2020, 22(9):1837-1847. SUN Y, LIU X, SU Y C, et al. County urbanization level estimated from nighttime light data in Anhui Province[J]. Journal of Geo-Information Science, 2020, 22(9):1837-1847.

[20] 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. XU H Q. A remote sensing index for assessment of regional ecological changes[J]. China Environmental Science, 2013, 33(5):889-897.

[21] XU H, WANG M, SHI T, et al. Prediction of ecological effects of potential population and impervious surface

increases using a remote sensing based ecological index (RSEI)[J].*Ecological Indicators*, 2018, 93:730-740.

[22] 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. MIAO X H, LIANG Q O. Analysis of ecological environment changes in yongjiang river basin based on remote sensing ecological index[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2021, 30(2):427-438.

[23] 张亚球, 姜放, 纪梦达, 等. 基于遥感指数的区县级生态环境评价[J]. *干旱区研究*, 2020, 37(6):1598-1605. ZHANG Y Q, JIANG F, JI M D, et al. Assessment of the ecological environment at district and county level based on remote sensing index[J]. *Arid Zone Research*, 2020, 37(6):1598-1605.

[24] 吴宜进, 赵行双, 奚悦, 等. 基于 MODIS 的 2006—2016 年西藏生态质量综合评价及其时空变化[J]. *地理学报*, 2019, 74(7):1438-1449. WU Y J, ZHAO X S, XI Y, et al. Comprehensive evaluation and spatial-temporal changes of eco-environmental quality based on MODIS in Tibet during 2006-2016[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(7):1438-1449.

[25] ELVIDGE C, ZISKIN D, BAUGH K, et al. A fifteen year record of global natural gas flaring derived from satellite data[J]. *Energies*, 2009, 2(3):595-622.

[26] LIU Z, HE C, ZHANG Q, 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.

[27] ELVIDGE C D, ZHIZHIN M, GHOSH T, et al. Annual time series of global VIIRS nighttime lights derived from monthly averages:2012 to 2019[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(5):922.

[28] ELVIDGE C D, BAUGH K, ZHIZHIN M, et al. VIIRS night-time lights[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2017, 38(21):5860-5879.

[29] WU K, WANG X. Aligning pixel values of DMSP and VIIRS nighttime light images to evaluate urban dynamics[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(12):1463.

[30] MA J, GUO J, AHMAD S, et al. Constructing a new inter-calibration method for DMSP-OLS and NPP-VIIRS nighttime light[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(6):937.

[31] LI X, LI D, XU H, et al. Intercalibration between DMSP/OLS and VIIRS night-time light images to evaluate city light dynamics of Syria' s major human settlement during Syrian Civil War[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2017, 38(21):5934-5951.

[32] GORELICK N, HANCHER M, DIXON M, et al. Google earth engine:Planetary-scale geospatial analysis for everyone[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 202:18-27.

[33] LIU X, HU G, CHEN Y, et al. High-resolution multi-temporal mapping of global urban land using Landsat images based on the Google Earth Engine Platform[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 209:227-239.

[34] HIRD J, DELANCEY E, MCDERMID G, et al. Google earth engine, open-access satellite data, and machine learning

in support of large-area probabilistic wetland mapping[J]. Remote Sensing, 2017, 9(12):1315.

[35] TELUGUNTLA P, THENKABAIL P S, OLIPHANT A, et al. A 30-m landsat-derived cropland extent product of Australia and China using random forest machine learning algorithm on Google Earth Engine cloud computing platform[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2018, 144:325-340.

[36] 陈晋, 卓莉, 史培军, 等. 基于 DMSP/OLS 数据的中国城市化过程研究——反映区域城市化水平的灯光指数的构建[J]. 遥感学报, 2003, 7(3):168-175, 241. CHEN J, ZHUO L, SHI P J, et al. The study on urbanization process in China based on DMSP/OLS data: Development of a light index for urbanization level estimation[J]. Journal of Remote Sensing, 2003, 7(3):168-175, 241.

[37] 卓莉, 史培军, 陈晋, 等. 20 世纪 90 年代中国城市时空变化特征——基于灯光指数 CNLI 方法的探讨[J]. 地理学报, 2003, 58(6):893-902. ZHUO L, SHI P J, CHEN J, et al. Application of compound night light index derived from DMSP/OLS data to urbanization analysis in China in the 1990s[J]. Acta Geographica Sinica, 2003, 58(6):893-902.

[38] 刘耀彬, 李仁东, 宋学锋. 中国城市化与生态环境耦合度分析[J]. 自然资源学报, 2005, 20(1):105-112. LIU Y B, LI R D, SONG X F. Analysis of coupling degrees of urbanization and ecological environment in China[J]. Journal of Natural Resources, 2005, 20(1):105-112.

[39] ZHOU D, XU J, LIN Z. Conflict or coordination? Assessing land use multi-functionalization using production-living-ecology analysis[J]. Science of the Total Environment, 2017, 577:136-147.

[40] LIU W, JIAO F, REN L, et al. Coupling coordination relationship between urbanization and atmospheric environment security in Jinan City[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 204:1-11.