

doi: 10. 6046/zrzyyg. 2022371
引用格式: 李光哲,王浩,曹银璇,等. 长株潭城市群生态环境质量时空演变及影响因素分析[J]. 自然资源遥感,2023,35(4): 244 – 254. (Li G Z, Wang H, Cao Y X, et al. Spatio – temporal evolution and influencing factors of ecological environment quality in the Changsha – Zhuzhou – Xiangtan urban agglomeration[J]. Remote Sensing for Natural Resources,2023,35(4):244 – 254.)

长株潭城市群生态环境质量时空演变及影响因素分析

李光哲^{1,2}, 王 浩^{1,2}, 曹银璇², 张晓宇², 宁晓刚^{1,2}

(1. 山东科技大学测绘与空间信息学院,青岛 266590; 2. 中国测绘科学研究院,北京 100036)

摘要: 准确把握新型城市群生态环境质量的演变趋势,识别其影响因素,对科学引导城市化并实现可持续发展具有重大意义。在目前新型城市群生态环境质量时空演变特征评价研究中,缺乏多因素对生态环境质量的交互影响的相关研究,针对此问题,该文基于 Google Earth Engine(GEE)平台,以长时序 Landsat TM/OLI 遥感影像为基础数据源,采用遥感生态指数(remote sensing ecological index, RSEI),结合 Sen 斜率估计和 Mann – Kendall 检验方法,探究 1990—2020 年长株潭城市群生态环境质量的时空变化特征,并运用地理探测器定量测度不同因素对长株潭城市群生态环境空间异质性的影响。研究表明,长株潭城市群生态环境质量总体较好,空间分布总体上遵循“边缘地区较好,核心区较差”的格局。长株潭城市群生态环境质量等级为“优”和“良”的面积平均占比超过 60%。可持续发展理念转变了长株潭城市群城市无序扩张的发展模式,使得 RSEI 呈现先下降后上升的趋势,并在 2000 年出现拐点。1990—2020 年长株潭城市群中心城区生态环境质量退化严重,非中心城区生态环境质量变化以提升为主。自然地理条件是显著影响长株潭城市群早期生态环境质量的主要因素,但随着社会经济发展,夜间灯光等社会经济因素对生态环境质量影响逐渐增强,并逐步发挥主导性作用;各因子在交互作用下对生态环境质量的影响显著增强,2010 年前人文因素和自然因素间的交互作用对生态环境影响较强,而 2015 年后人文因素间的交互作用对生态环境质量影响较强。该研究结果可为推进长株潭城市群一体化高质量发展提供科学依据,同时也为其他同类型城市群发展提供参考。

关键词: 长株潭城市群; Google Earth Engine; 遥感生态指数; 地理探测器; 生态环境质量

中图法分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097 – 034X(2023)04 – 0244 – 11

0 引言

随着全球城市化进程的加快,城市群已经成为人类定居和经济发展的核心^[1]。在人地关系矛盾日益加重的背景下,社会经济与生态环境作为城市群可持续发展的重点一直深受关注^[2]。目前我国城市群发展取得了显著成就^[3],但伴随而来的是大气污染^[4]、热岛效应加强^[5]和生态用地被城市用地大规模侵占^[6]等一系列的生态环境问题,制约了城市群的可持续发展^[7]。针对上述问题,许多学者开展了相关研究,对城市群社会经济与生态环境发展现状进行评价,如梁龙武等^[8]、李平星等^[9]和王渊等^[10]分别针对京津冀、长三角和珠三角开展相关研究。已有研究多聚焦于探究上述一线城市群^[11]生态环境质量,但随着国内新型城市群的飞速崛起,长

株潭、山东半岛和呼包鄂榆等城市群为我国经济发展提供巨大贡献,因此掌握此类城市群的生态环境质量对可持续性发展同样具有指导意义。

目前评价生态环境质量的方法主要有:“压力—状态—响应”(pressure – state – response)模型^[12–14]以及生态环境状况指数^[15,16](ecological index)。上述评价方法涉及的大量指标体系和数据,在地市级以下尺度获取难度大。其次,上述评价结果多为数值形式,难以体现空间分布状况,不利于后续开展针对性治理。相比于上述方法,徐涵秋^[17]提出的遥感生态指数(remote sensing ecological index, RSEI),充分利用遥感技术,克服了地市级以下尺度数据获取难的问题,同时能够实现数据的空间化和可视化展示,从而动态观测生态环境变化。自此,RSEI 指数被广泛运用。宋慧敏等^[18]、李妍等^[19]、王士远等^[20]采用 Landsat 卫星数据,分别对城市、乡

收稿日期: 2022 – 09 – 19; 修订日期: 2023 – 02 – 11
基金项目: 中央级公益科研院所基本科研业务费“国土空间规划背景下的城市认知 – 监测 – 体检关键技术及示范”(编号: AR2117)和自然资源规划及管理项目“国土空间规划专项监测”(编号: A2214)共同资助。
第一作者: 李光哲(1999 –),男,硕士研究生,研究方向为城市遥感与城市体检评估。Email: liguangzhe1213@163.com。
通信作者: 王 浩(1985 –),男,博士,副研究员,研究方向为城市遥感、城市体检评估。Email: wanghao@casm.ac.cn。

镇、自然保护区 3 个级别地区测算 RSEI,证明了 RSEI 在不同尺度的可靠性。但 RSEI 应用于较大区域时,面临庞大数据量带来的繁杂数据预处理和指标计算工作^[21]。Google Earth Engine(GEE)云平台是近年来全球使用高频的云处理平台^[22],该平台处理遥感影像能将时间与空间分辨率更好结合,在长时序遥感监测中优势突出。郑子豪等^[23]和张华等^[24]基于 GEE 云平台,结合 RSEI 进行了长三角城市群生态环境质量和祁连山国家公园生态环境评价与分析。结果表明,GEE 作为大区域范围的生态质量评价与监测的遥感计算平台,可以改善遥感数据缺失、色差和时间不一致的问题^[25];同时可以避免如辐射校正、大气校正、正射校正等数据预处理工作^[26]。因此本文将 RSEI 引入 GEE 平台评价城市群生态环境质量。

以往研究分析了研究区生态环境质量及其变化^[18,27-28],事实上,找出这些原因对于了解生态环境变化机制、采取切实措施保护和修复生态环境具有重要意义^[29]。生态环境质量影响因素的研究方法主要分为定性和定量分析。定性分析方法仅能表征生态环境质量与各影响因素的关系及发展趋势,难以明晰各因素对生态环境质量的影响程度;定量方法主要是相关性分析、多元回归模型等,此类方法仅定量分析单项影响因素对生态环境质量的影响,未能定量分析多影响因素在生态环境质量中的交互作用,且自然与人文要素间的多因素交互作用对生态环境质量的影响研究相对较少。地理探测器是探测空间分异及揭示其背后影响因子的统计学方法,它在度量空间分异度的同时,定量分析各影响因素之间的相对重要性和各影响因素交互作用对生态环境质量的影响^[30]。因此,本文引入地理探测器进一步分析城市群生态环境质量变化的影响因素。

鉴于此,在快速城镇化背景下,针对新型城市群生态环境质量评价匮乏,及其影响因素的空间异质性和交互性不清晰等问题,本文借助 GEE 平台,利用长时序 Landsat 卫星数据计算长株潭城市群 RSEI,分析 1990—2020 年长株潭城市群生态环境质量时空格局,运用 Sen 斜率估计和 Mann - Kendall (MK)检验进行长株潭城市群生态环境质量的变化趋势分析,并利用地理探测器定性分析影响因素与生态环境质量的发展趋势,定量分析影响因素间交互作用对长株潭城市群生态环境质量的影响。本文旨在为推进长株潭城市群一体化高质量发展提供科学依据,同时也为其他同类型城市群相关研究提供参考。

1 研究区概况及数据源

1.1 研究区概况

长株潭城市群地处于湖南省中东部,包括长沙、株洲、湘潭三市行政下辖 23 个县区(图 1)。地理位置位于 E111°58'38"~114°13'20",N26°18'19"~28°41'22"之间,总面积 $2.8 \times 10^4 \text{ km}^2$,属亚热带季风气候区,年平均降水约 1 400 mm,年均气温 16~18℃;境内地貌包括平原、岗、丘、山地等类型。长株潭城市群是湖南省的政治、经济和文化的核心经济区域以及城镇化进程较快的典型区域^[31],是中国第一个自觉开展区域经济一体化实验的城市群。作为长江中游城市群的重要组成部分,长株潭城市群被列为培育新型城镇化战略格局的重点城市群之一^[32],在城市化快速发展背景下城市扩展与生态环境质量之间的矛盾突出,具有一定代表性。

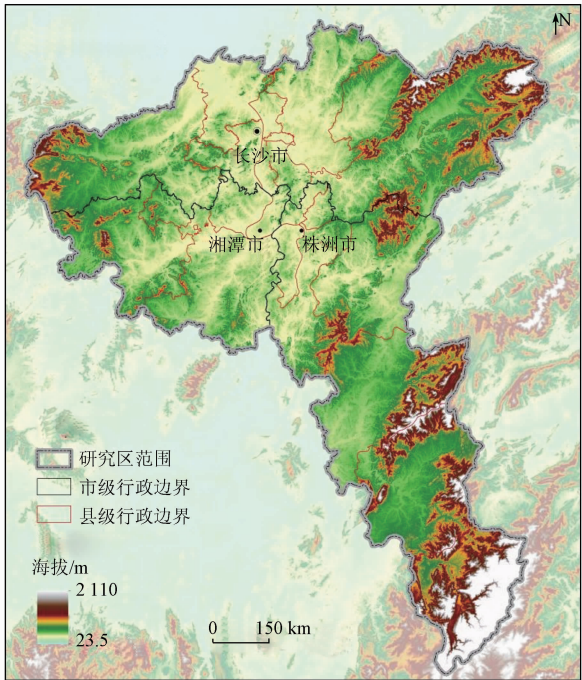


图 1 研究区地理位置

Fig.1 Geographic location of the study area

1.2 数据源及其预处理

本文所用数据如表 1 所示,Landsat 遥感数据以 1990 年、1995 年、2000 年、2005 年、2010 年、2015 年和 2020 年为中心年份,选取当年及前后年份生长季(4—10 月)云量较少且影像质量较好的 Landsat5 TM 和 Landsat8 OLI 作为主要数据,并基于 GEE 云平台在完成去云和去水掩模等预处理后进行 RSEI 计算。本文采用土地利用数据、人口密度数据、夜间灯光数据、降水数据、气温数据以及 DEM 数据表征研究区自然、社会发展情况,并作为影响因子参与地

表 1 数据来源及预处理
Tab. 1 Data source and pre-processing

数据名称	时间	分辨率	数据来源
影像数据	以 1990 年、1995 年、2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2020 年为中心年份(4—10 月)	30 m	Landsat5/8 (Google Earth Engine)
土地利用数据	1990 年、1995 年、2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2020 年	30 m	CNLUCC (http://www.resdc.cn)
人口密度数据	1990 年、1995 年、2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2019 年	1 km	中国人口空间分布公里网格数据集 (http://www.resdc.cn)
夜间灯光数据	1990 年、1995 年、2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2020 年	1 km	中国长时间序列逐年人造夜间灯光数据集 (http://data.tpdc.ac.cn)
降水数据	1990 年、1995 年、2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2020 年	1 km	中国 1 km 分辨率逐月降水量数据集 (http://data.tpdc.ac.cn)
气温数据	1990 年、1995 年、2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2020 年	1 km	中国 1 km 分辨率逐月平均气温数据集 (http://data.tpdc.ac.cn)
DEM 数据	—	30 m	ASTER GDEM V2 (http://www.gscloud.cn)

理探测器计算。其中 2020 年人口密度缺失,故采用 2019 年人口密度数据代替 2020 年人口密度数据,降水和气温数据为逐月数据集,为使数据时相保持一致,故选取 4—10 月的平均值作为代替值。各数据源在分辨率、投影和空间范围等方面存在不一致,因此在开展研究之前,根据研究区范围统一进行投影转换和裁剪。考虑到各数据分辨率的不同,最终采用最邻近法生成 100 m × 100 m 分辨率数据。

2 研究方法

2.1 RSEI 的计算

RSEI 是一种完全基于遥感数据得到的综合分析区域生态环境的方法,可以客观反映区域的生态环境质量^[17]。该方法选用绿度(normalized differen-

tial vegetation index, NDVI)、湿度(wetness, Wet)、热度(land surface temperature, LST)以及干度(normalized differential soil index, NDSI)4 个生态变量,能够直观反映区域生态环境质量优劣情况^[33]。各生态指标的计算方法如下^[34]:

$$NDVI = (B_{NIR} - B_{red}) / (B_{NIR} + B_{red}) \quad , \quad (1)$$

$$Wet_{TM} = 0.0315B_{blue} + 0.2021B_{green} + 0.3102B_{red} + 0.1594B_{NIR} - 0.6806B_{SWIR1} - 0.6109B_{SWIR2} \quad , \quad (2)$$

$$Wet_{OLI} = 0.1511B_{blue} + 0.1973B_{green} + 0.3283B_{red} + 0.3407B_{NIR} - 0.7117B_{SWIR1} - 0.4559B_{SWIR2} \quad , \quad (3)$$

$$LST = T / [1 + (\lambda T / \rho) \ln \varepsilon] - 273.15 \quad , \quad (4)$$

$$NDSI = (IBI + SI) / 2 \quad , \quad (5)$$

$$IBI = \frac{2B_{SWIR1} / (B_{SWIR1} + B_{NIR}) - [B_{NIR} / (B_{NIR} + B_{red}) + B_{green} / (B_{green} + B_{SWIR1})]}{2B_{SWIR1} / (B_{SWIR1} + B_{NIR}) + [B_{NIR} / (B_{NIR} + B_{red}) + B_{green} / (B_{green} + B_{SWIR1})]} \quad , \quad (6)$$

$$SI = [(B_{SWIR1} + B_{red}) - (B_{NIR} + B_{blue})] / [(B_{SWIR1} + B_{red}) + (B_{NIR} + B_{blue})] \quad , \quad (7)$$

式中: B_i 为 Landsat 波段的地表反射率; SI 为土壤指数; IBI 为建筑指数。由于 4 个指标的量纲不统一,为减小对研究结果的影响,将各指标进行归一化处理,使量纲在 0 ~ 1 之间。计算公式为:

$$NI = (I - I_{min}) / (I_{max} - I_{min}) \quad , \quad (8)$$

式中: NI 为归一化指标; I 为原始指标; I_{min} 为指标 I 的最小值; I_{max} 为指标 I 的最大值。

经过归一化的 4 个指标通过主成分分析方法进行合成,并选取得到的第一主成分作为 RSEI,值越大表示生态环境质量越好,计算公式为:

$$RSEI = PCA1[f(NDVI, Wet, LST, NDSI)] \quad . \quad (9)$$

2.2 Sen 斜率估计和 MK 检验的趋势分析

本文利用 Sen 斜率估计和 MK 检验进行长株潭

城市群生态环境质量的变化趋势分析。Sen 斜率估计,是一种稳健的非参数统计的趋势计算方法。该方法计算效率高,对于测量误差和利群数据不敏感,适用于长时间序列数据的趋势分析^[35]。MK 检验是一种非参数的时间序列趋势性检验方法,其不需要测量值服从正态分布,不受缺失值和异常值的影响,适用于长时间序列数据的趋势显著检验^[36]。

Sen 斜率估计的计算公式为:

$$\beta = \text{Median} \frac{(RSEI_j - RSEI_i)}{j - i}, \forall j > i \quad , \quad (10)$$

式中: β 为时间序列数据的趋势变化; $RSEI_j$ 和 $RSEI_i$ 为时间序列的 $RSEI$ 值, $1 < i < j < n$; $\beta > 0$, 表示生态环境质量呈现提升趋势,反之退化。

MK 检验统计量 S 的计算公式为:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \operatorname{sgn}(RSEI_j - RSEI_i), \quad (11)$$
$$\operatorname{sgn}(RSEI_j - RSEI_i) = \begin{cases} 1 & RSEI_j - RSEI_i > 0 \\ 0 & RSEI_j - RSEI_i = 0 \\ -1 & RSEI_j - RSEI_i < 0 \end{cases}. \quad (12)$$

根据时间序列长度 n 值的不同,显著性检验统计量的选择也对应发生改变。当 $n \geq 10$ 时,统计量 S 近似服从标准正态分布,此时用检验统计量 Z 趋势检验, Z 值的计算如下:

$$Z = \begin{cases} \frac{S - 1}{\sqrt{\operatorname{Var}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S + 1}{\sqrt{\operatorname{Var}(S)}} & S < 0 \end{cases}, \quad (13)$$
$$\operatorname{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18}. \quad (14)$$

采用显著性水平 $\alpha = 0.05$ 进行显著性检验。生态环境质量变化等级如表 2 所示。

表 2 生态环境质量变化等级

Tab. 2 Eco-environmental quality change level				
β	趋势	Z	显著性	趋势特征
$\beta > 0$	提升	$Z > 1.96$	显著	显著提升
		$0 < Z \leq 1.96$	不显著	不显著提升
$\beta = 0$	无变化	Z	—	无变化
$\beta < 0$	退化	$0 < Z \leq 1.96$	不显著	不显著退化
		$Z > 1.96$	显著	显著退化

2.3 地理探测器影响因素分析

地理探测器是探测和利用空间分异性的工具,包括分异及因子探测、交互作用探测、风险区探测和生态探测^[37]。本文主要采用分异及因子探测和交互作用探测来揭示不同因素及其相互作用对长株潭城市群生态环境质量的影响。

1)分异及因子探测。探测因变量 Y 的空间分异性,以及自变量 X 对因变量 Y 影响程度 q 的空间分异。本文中, q 为单因子对生态环境质量的影响程度,计算公式为:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2}, \quad (15)$$

式中: L 为因变量 Y 的分类数; N_h 和 N 分别为分类 h 和全局的样本数; σ_h^2 和 σ^2 分别为分类 h 和全局的方差。 q 值域为 $[0,1]$,值越大说明探测因子对生态环境质量的影响程度越强,反之则越弱。极端情况

下, q 值为 1 时表明因子 X 完全控制了 Y 的空间分布, q 值为 0 时则表明因子 X 与 Y 没有任何关系。

2)交互作用探测。识别不同影响因素 X_i 之间的交互作用,即评估影响因素 X_1 和 X_2 共同作用时是否会增加或减弱对因变量 Y 的影响。具体实现方法为:首先,分别计算因素 X_1 和 X_2 对 Y 的 q 值,即 $q(X_1)$ 和 $q(X_2)$;其次,计算它们交互时的 q 值,即 $q(X_1 \cap X_2)$;最后,对 $q(X_1)$ 、 $q(X_2)$ 与 $q(X_1 \cap X_2)$ 进行比较^[30],如表 3 所示。

表 3 交互作用 q 值与单因子 q 值对比关系表

Tab. 3 Interaction q -value and single-factor q -value comparison table				
交互关系	与单因子 q 值相比	单因子较小值	单因子较大值	两因子之和
非线性减弱	交互作用 q 值	<	<	<
单因子非线性减弱	交互作用 q 值	>	<	<
双因子增强	交互作用 q 值	>	>	<
独立	交互作用 q 值	>	>	=
非线性增强	交互作用 q 值	>	>	>

结合数据的可获取性原则,从人文(土地利用、人口密度和夜间灯光)和自然(DEM、降水量和温度)2 个角度,选取 6 个影响因素作为自变量 X ,将 RSEI 作为因变量 Y 。为客观准确获取因子探测分析结果,运用 ArcGIS 10.7 软件,将上述自变量 X 转化为栅格数据,运用自然断点法进行分级赋值,综合考虑研究区面积和空间特征等因素,创建研究区范围内 $3\text{ km} \times 3\text{ km}$ 格网,以格网中心点为样本点,共计 3 122 个,通过格网中心点分别匹配 RSEI 值与 6 个影响因素值,利用地理探测器进行分异及因子探测和交互作用探测,揭示不同影响因素的空间分布及其因素间交互作用对生态环境质量的影响。

3 结果与分析

3.1 长株潭城市群生态环境质量空间格局

RSEI 值从 0 ~ 1 表示生态环境质量由差到好,本研究 RSEI 数据主要集中在 0.3 ~ 0.8 之间,尤其在 0.4 ~ 0.7 之间分布密集,符合正态分布。为表述清晰且便于计算,采用自然断点法对 7 期 RSEI 结果进行分级,计算各级平均值后进行取整处理,以此作为长株潭生态环境质量最终分级标准^[38]。将生态环境质量等级划分为 5 类,分别为“差” $[0,0.40)$ 、“较差” $[0.40,0.55)$ 、“中等” $[0.55,0.65)$ 、“良” $[0.65,0.70)$ 、“优” $[0.70,1]$ 。1990—2020 年长株潭城市群生态环境质量分类结果如图 2 所示。长株潭城市群生态环境质量的空间分布总体上遵循“边缘地区较好,核心区较差”的格局。生态环境质量

“优”和“良”的地区主要分布在长株潭城市群的东北部 and 东南部边缘区,如浏阳市东部、攸县东部、茶陵县北部和东南部以及炎陵县的大部分地区。生态

环境质量“差”和“较差”的地区不断增加,主要集中在开福区、芙蓉区、雨花区 and 雨湖区等城市群中部核心区。

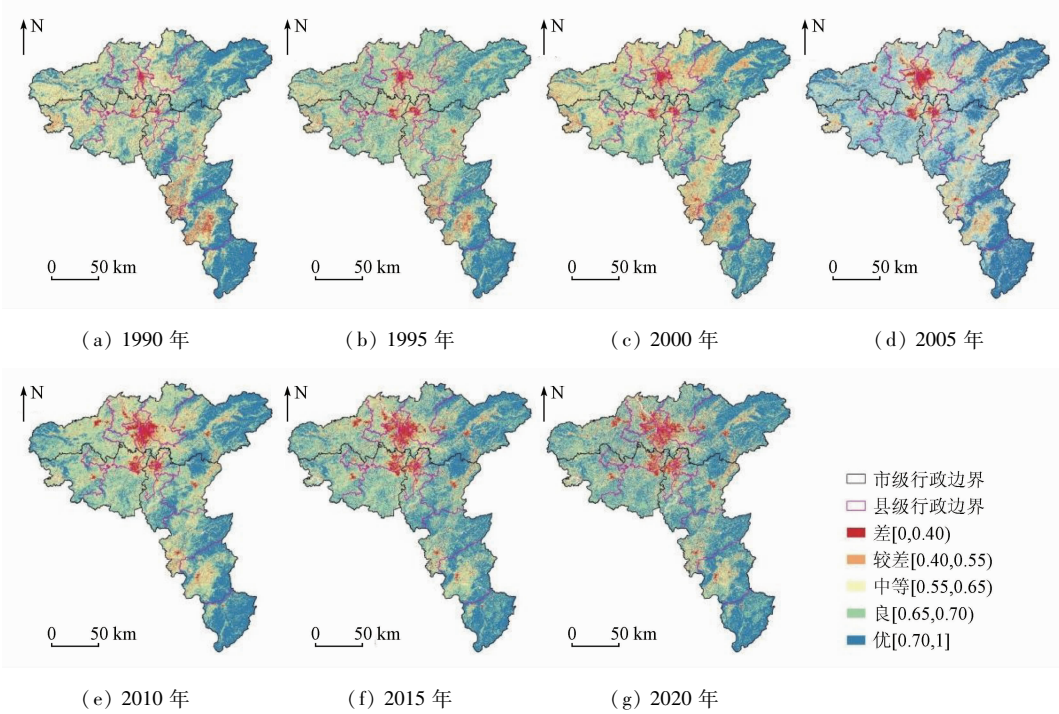


图 2 长株潭城市群生态环境质量空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of ecological environment quality in Changsha – Zhuzhou – Xiangtan urban agglomeration

生态环境质量分类的面积和百分比如图 3 所示。1990—2000 年 RSEI 值呈现下降趋势,2000—2020 年 RSEI 值呈现上升趋势。1990—2020 年 30 a 间生态环境质量“优”和“良”面积平均占比大于 60%,长株潭城市群生态环境质量整体向好。生态环境质量等级“优”和“良”上下浮动的面积占比在 10% ~ 15% 之间,2020 年“优”和“良”的面积占比最大。1990—2020 年生态环境质量“差”的面积占比总体呈上升趋势。总体而言,1990—2020 年长株潭城市群生态环境质量整体呈现上升趋势。

3.2 长株潭城市群生态环境质量变化趋势

采用 Sen 斜率估计和 MK 检验得到 1990—2020 年长株潭城市群生态环境质量时空变化趋势图,并依据 2.2.2 中生态环境质量变化等级进行分类,结果如图 4 所示。“显著退化”地区主要位于研究区中部核心地区,城市建成区急剧扩张,城市建设面积不断扩大造成生态环境质量不断恶化。“不显著退

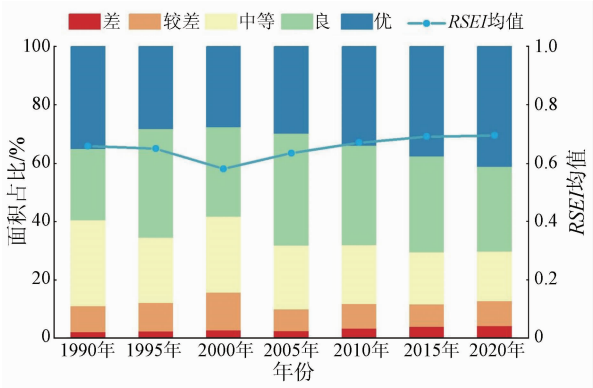


图 3 生态环境质量分类的面积占比

Fig. 3 The proportion of area classified by ecological environment quality

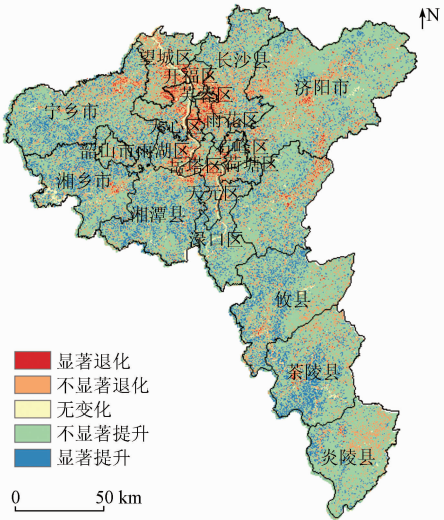


图 4 长株潭城市群生态环境质量变化趋势空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of ecological environment quality change trend in Changsha – Zhuzhou – Xiangtan urban agglomeration

化”地区主要位于炎陵县中部、攸县和茶陵县交界处、浏阳市西北部。“无变化”地区主要位于河流和湖泊。“不显著提升”地区在整个研究区内分布较为分散。“显著提升”地区主要位于研究区茶陵县西南部、攸县西部、湘潭县和湘乡市。1990—2020 年长株潭城市群生态环境质量“显著提升”面积为 4 168.22 km²,占比为 14.82%，“不显著提升”面积为 18 150.14 km²,占比为 64.55%；“无变化”面积为 511.28 km²,占比为 1.82%；“不显著退化”面积为 4 742.69 km²,占比为 16.87%，“显著退化”面积为 545.93 km²,占比为 1.94%。长株潭城市群生态环境质量显著提升。

1990—2020 年长株潭城市群县区生态环境质量变化情况如图 5 所示,其中,退化 = 显著退化 + 不显著退化,提升 = 显著提升 + 不显著提升；中心城区为雨湖区、岳塘区、芙蓉区、开福区、天心区、望城区、岳麓区、荷塘区、芦淞区、浏口区、石峰区和天元区,不同县区的空间分布和生态质量变化百分比呈现出不同的变化趋势。总体而言,长株潭城市群的中心城区呈现出明显的退化趋势,且“不显著提升”的地区主要分布在边缘县区。芙蓉区、天心区和开福区生态环境质量退化面积占比较大,分别占城市总面积的 58.99%,57.84% 和 52.30%。湘潭

县、湘乡市、浏阳市、宁乡市、茶陵县、醴陵市、浏口区、炎陵县、攸县生态环境质量提升面积占比大于 80%。

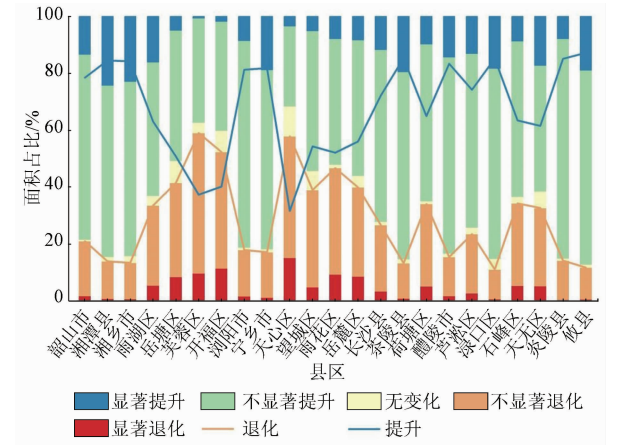


图 5 1990—2020 年长株潭城市群县区生态环境质量变化情况
Fig.5 Changes in ecological and environmental quality of counties and districts in Changsha – Zhuzhou – Xiangtan urban agglomeration from 1990 to 2020

3.3 长株潭城市群生态环境质量影响因素
地理探测器各因子空间分布如图 6 所示。土地利用类型中城乡、工矿、居民用地较集中出现在中部核心地区,林地分布在东北部和东南部地区。人口密度和夜间灯光的空间分布大体一致,均呈现中部

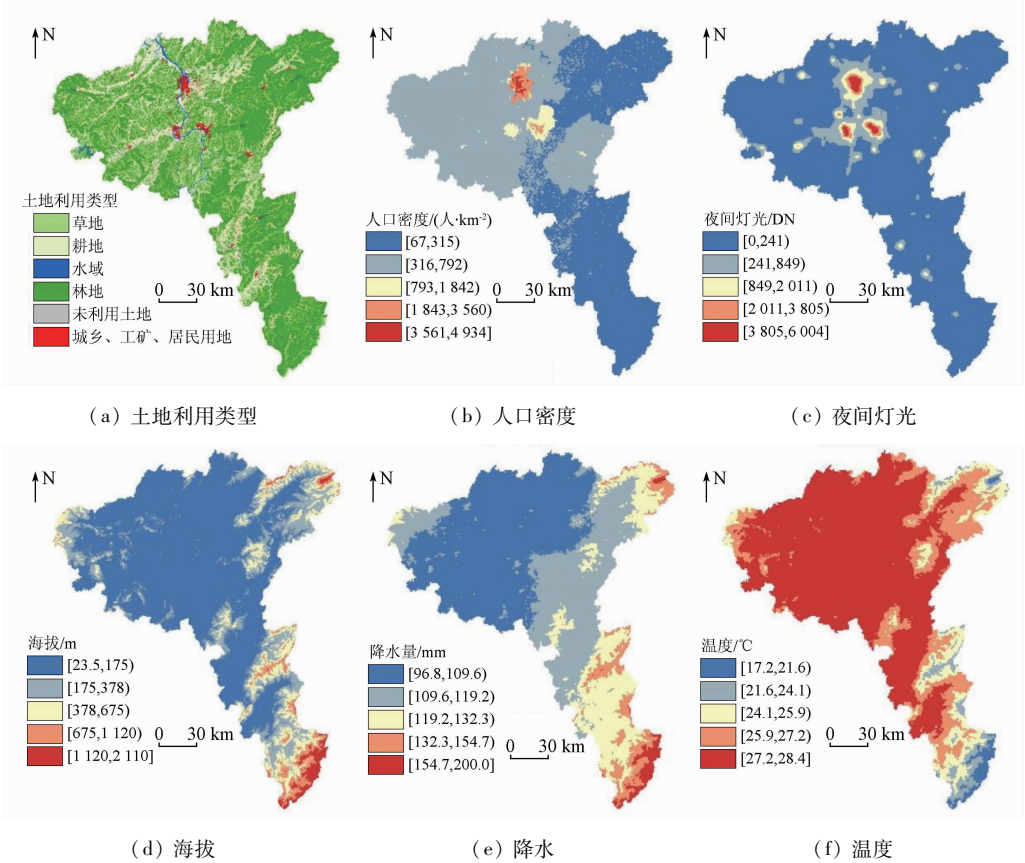


图 6 1990 年生态环境质量影响因子空间分布
Fig.6 Spatial distribution of factors affecting ecological environment quality in 1990

核心建成区数值较高,东北部和东南部地区山区数值较低。海拔表现为东北部和东南部山区到中部平原放缓的空间形态。降水量呈现由中部向四周逐渐增加的趋势。温度呈现由中部向四周逐渐降低的趋势。

3.3.1 分异及因子探测结果分析

根据地理探测器模型的分异及因子探测结果(表4)所示,所有影响因子的显著性检验 P 值均 < 0.01 ,表明所选因子均对长株潭城市群生态环境质量的空间分布具有显著影响。1990—2020 年间 q 值排名第一依次为 DEM(0.296 1)、DEM(0.217 7)、土地利用(0.291 6)、夜间灯光(0.293 5)、土地利用(0.367 9)、夜间灯光(0.335 1)和土地利用

(0.339 7)。1990—1995 年间,DEM 和温度对生态环境质量的影响排名前二,而土地利用和夜间灯光对生态环境质量的影响位于末尾阶段。2000 年土地利用对生态环境质量的影响排名第一,DEM 对生态环境质量的影响降至第二,但温度和降水要高于夜间灯光和人口密度对生态环境质量的影响。2000 年对生态环境质量的影响由自然因素向人文因素的过渡。2005—2020 年间,土地利用和夜间灯光对生态环境质量的影响排名前二,而降水和温度等自然因素对研究区的生态环境质量影响位于末尾阶段。综合来看,1990—2000 年间自然因素 $>$ 人文因素的影响,2005—2020 年人文因素 $>$ 自然因素的影响。

表 4 分异及因子探测结果的 q 值^①
Tab.4 Divergence and q - values of factor detection results

年份	土地利用(X_1)	人口密度(X_2)	夜间灯光(X_3)	海拔(X_4)	降水(X_5)	温度(X_6)
1990 年	0.112 3 * * * * [4]	0.105 3 * * * * [5]	0.082 4 * * * * [6]	0.296 1 * * * * [1]	0.168 2 * * * * [3]	0.277 7 * * * * [2]
1995 年	0.164 0 * * * * [4]	0.172 0 * * * * [3]	0.142 6 * * * * [5]	0.217 7 * * * * [1]	0.092 9 * * * * [6]	0.190 4 * * * * [2]
2000 年	0.291 6 * * * * [1]	0.136 0 * * * * [6]	0.164 1 * * * * [5]	0.267 9 * * * * [2]	0.171 7 * * * * [4]	0.239 4 * * * * [3]
2005 年	0.283 8 * * * * [2]	0.205 0 * * * * [5]	0.293 5 * * * * [1]	0.257 6 * * * * [3]	0.156 8 * * * * [6]	0.211 2 * * * * [4]
2010 年	0.367 9 * * * * [1]	0.226 5 * * * * [4]	0.324 0 [2]	0.254 6 [3]	0.154 1 [6]	0.220 3 [5]
2015 年	0.292 3 * * * * [2]	0.179 3 * * * * [4]	0.335 1 * * * * [1]	0.191 1 * * * * [3]	0.138 7 * * * * [6]	0.169 8 * * * * [5]
2020 年	0.339 7 * * * * [1]	0.142 6 * * * * [5]	0.274 4 * * * * [2]	0.176 1 * * * * [3]	0.088 8 * * * * [6]	0.162 8 * * * * [4]

① *, **, *** 分别表示 $P < 0.1, P < 0.05, P < 0.01$; [] 内数字代表对应因子在当期的影响因素排名。

3.3.2 交互作用探测结果分析

分别对 1990 年、1995 年、2000 年、2005 年、2010 年、2015 年和 2020 年 7 期因子交互作用结果进行排序,将交互作用影响排名前 10 的因子组合整理得到表 5。1990—2020 年间各因素间的交互作用表现出对生态环境质量的影响具有小范围波动,呈现先增强后减弱趋势。1990—2010 年 q 值排名第一的为土地利用 $\cap$ 海拔,分别为 0.349 6,0.329 1,0.426 6,0.437 5 和 0.520 7; 2015—2020 年 q 值排名第一的为土地利用 $\cap$ 夜间灯光 0.427 2 和 0.410 5,与分异及因子探测结果相比 q 值提升程度在 5% ~ 15% 之间。1990—2010 年交互作用 q 值在不断升

高,从 0.349 6 到 0.502 7,2020 年跌落至 0.410 5。排名前十的影响因素中多以土地利用、夜间灯光、DEM 和人口密度两两组合。在 2010 年以前土地利用和 DEM 对生态环境质量表现出较突出的影响作用,说明 2010 年以前人文和自然因素都对生态环境质量产生影响。在 2015 年后土地利用和夜间灯光对生态环境质量表现出较突出的影响作用,说明 2015 年以后人文因素成为生态环境质量主要的影响因素。结果显示,各因子在交互作用下对生态环境的影响度均比单因子大,说明长株潭城市群生态环境质量并不仅仅是单因子作用的结果,而是各因子交互后增强的结果。

表 5 因子交互作用探测结果的 q 值

Tab. 5 The q values for factor interaction detection results

年份	交互因子									
1990 年	0.349 6 $X_1 \cap X_4$	0.338 2 $X_3 \cap X_4$	0.337 1 $X_1 \cap X_6$	0.324 8 $X_2 \cap X_4$	0.321 1 $X_3 \cap X_6$	0.309 0 $X_4 \cap X_5$	0.306 1 $X_2 \cap X_6$	0.305 6 $X_4 \cap X_6$	0.302 3 $X_5 \cap X_6$	0.296 2 $X_1 \cap X_2$
1995 年	0.329 1 $X_1 \cap X_4$	0.310 3 $X_1 \cap X_6$	0.308 3 $X_3 \cap X_4$	0.289 9 $X_1 \cap X_2$	0.285 7 $X_2 \cap X_4$	0.281 1 $X_3 \cap X_6$	0.258 1 $X_1 \cap X_5$	0.256 7 $X_2 \cap X_6$	0.242 5 $X_2 \cap X_5$	0.236 3 $X_3 \cap X_5$
2000 年	0.426 6 $X_1 \cap X_4$	0.415 2 $X_1 \cap X_6$	0.389 1 $X_1 \cap X_5$	0.362 6 $X_1 \cap X_2$	0.356 0 $X_1 \cap X_3$	0.349 3 $X_3 \cap X_4$	0.323 3 $X_2 \cap X_4$	0.320 0 $X_3 \cap X_6$	0.291 1 $X_2 \cap X_6$	0.284 4 $X_4 \cap X_5$
2005 年	0.437 5 $X_1 \cap X_4$	0.434 6 $X_3 \cap X_4$	0.420 4 $X_1 \cap X_3$	0.412 8 $X_1 \cap X_6$	0.393 6 $X_3 \cap X_6$	0.386 0 $X_1 \cap X_5$	0.383 6 $X_1 \cap X_2$	0.377 3 $X_2 \cap X_4$	0.369 5 $X_3 \cap X_5$	0.334 3 $X_2 \cap X_6$
2010 年	0.502 7 $X_1 \cap X_4$	0.482 2 $X_1 \cap X_6$	0.477 2 $X_1 \cap X_3$	0.463 9 $X_3 \cap X_4$	0.449 7 $X_1 \cap X_5$	0.445 5 $X_1 \cap X_2$	0.428 3 $X_3 \cap X_6$	0.412 4 $X_3 \cap X_5$	0.385 7 $X_2 \cap X_4$	0.351 3 $X_2 \cap X_6$
2015 年	0.427 2 $X_1 \cap X_3$	0.411 6 $X_3 \cap X_4$	0.393 9 $X_3 \cap X_6$	0.387 5 $X_1 \cap X_4$	0.377 1 $X_1 \cap X_6$	0.368 5 $X_3 \cap X_5$	0.363 5 $X_1 \cap X_5$	0.349 6 $X_1 \cap X_2$	0.348 5 $X_2 \cap X_3$	0.335 2 $X_2 \cap X_4$
2020 年	0.410 5 $X_1 \cap X_3$	0.404 7 $X_1 \cap X_6$	0.410 5 $X_1 \cap X_4$	0.382 6 $X_1 \cap X_5$	0.369 3 $X_1 \cap X_2$	0.354 1 $X_3 \cap X_4$	0.342 8 $X_3 \cap X_6$	0.339 7 $X_2 \cap X_6$	0.321 6 $X_3 \cap X_5$	0.293 3 $X_2 \cap X_3$

综合地理探测器的分析结果,长株潭城市群的生态环境质量空间分异性不仅是单一影响因子直接、独立作用的结果,而是人文因子和自然因子等影响因素交互后互相增强的综合作用导致的。分异及因子探测和交互探测结果的差异反映出,对于长株潭城市群生态环境质量的空间分异性的影响,大部分影响因子通过与其他因子的协同作用可以比单独作用更好地体现出来。

4 讨论与结论

4.1 讨论

长株潭城市群生态环境质量变化主要受到自然因素和人文因素的双重作用。1990—2000 年自然因素 > 人文因素对生态环境质量的影响,2000—2020 年人文因素 > 自然因素对生态环境质量的影响。1990—2000 年,长株潭城市群呈现自然式发展,人为干预因素少,使该时期内自然因素对生态环境质量的影响较大。2000—2020 年,长株潭城市群实施《长株潭城市群资源节约型和环境友好型社会建设综合配套改革试验总体方案》《长株潭城市群生态绿心地区总体规划》和《长株潭城市群生态绿心地区保护条例》等保护和管理措施,开始建立区域性生态环境补偿机制,提出“一核三带”发展战略,增强了长株潭城市群向周边的辐射能力,更加突出长株潭城市群生态绿心的优先定位。随着生态文明建设理念的不断推进与落实,城市群发展更加注重向绿色转型,生态环境质量明显变好。这一系列的理念和管理措施使得人文因素的影响迅速提升。

本文通过 GEE 平台极大地提高了影像处理的效率,同时结合地理探测器定量分析了影响因素交互作用对生态环境质量的影响。本研究可为未来新

兴城市群可持续发展提供相关参考。然而,本文仍存在一定局限性。首先,本文仅确定了城市群尺度上生态环境质量的主导因素,缺乏对更加精细尺度下生态环境质量的影响因素分析,下一步考虑利用其他地理空间模型,如时间地理加权回归模型,在县区级、格网级等精细尺度上探究生态环境质量与影响因素的时空关系。此外,对于自然和人文因素之间交互作用的复杂机理探讨不够深入,未来可纳入能反映区域自然和人文发展状况的多源大数据,探索新时代生态环境与社会经济协调发展模式,利用网络分析等方法探究区域生态环境质量影响因素之间的关系。

4.2 结论

本文运用 GEE 计算 1990—2020 年长株潭城市群的 RSEI,首次揭示长株潭城市群生态环境质量的时空分布特征,利用 Sen 斜率估计和 MK 检验分析长株潭城市群生态环境质量的时空变化,并运用地理探测器进一步定量解析影响生态环境质量的影响因素及各因素的交互影响,得出以下主要结论:

1)长株潭城市群生态环境质量总体较好,空间分布总体上遵循“边缘地区较好,核心区较差”的格局。长株潭城市群生态环境质量等级为“优”和“良”的面积平均占比超过 60%。可持续发展理念转变了长株潭城市群城市无序扩张的发展模式,使得城市群 RSEI 总体上呈现先下降后上升趋势,并在 2000 年出现拐点。

2)虽然城市群 RSEI 总体呈上升趋势,但中心城区生态环境质量退化严重,非中心城区生态环境质量变化以提升为主。生态环境质量“显著提升”的县区分布在南部、西部和北部地区(茶陵县、湘潭县、湘乡市和宁乡市等);“显著退化”的县区主要分布在中部核心城区(岳塘区、芙蓉区、开福区等)。

3)1990—2020 年 30 a 间 DEM、土地利用和夜间灯光对长株潭城市群生态环境质量影响较强,人口密度、降水和温度的影响作用较弱。1990—2000 年间自然因素大于人文因素的影响,2005—2020 年人文因素大于自然因素的影响。分异及因子探测和交互作用探测表明,交互作用相比单因子,对生态环境质量的影响提升 5% ~ 15%。2010 年前人文因素和自然因素间的交互作用对生态环境影响较强,而 2015 年后人文因素间的交互作用对生态环境质量影响较强。

参考文献 (References) :

[1] Bao C, He D M. Scenario modeling of urbanization development and water scarcity based on system dynamics: A case study of Beijing - Tianjin - Hebei urban agglomeration, China[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, 16(20) : 3834.

[2] Wan J J, Li Y X, Ma C C, et al. Measurement of coupling coordination degree and spatio - temporal characteristics of the social economy and ecological environment in the Chengdu - Chongqing urban agglomeration under high - quality development[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, 18(21) : 11629.

[3] 方创琳,张国友,薛德升. 中国城市群高质量发展与科技协同创新共同体建设[J]. 地理学报, 2021, 76(12) : 2898 - 2908.

Fang C L, Zhang G Y, Xue D S. High - quality development of urban agglomerations in China and construction of science and technology collaborative innovation community[J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(12) : 2898 - 2908.

[4] 李茜,姚慧琴. 京津冀城市群大气污染治理效率及影响因素研究[J]. 生态经济, 2018, 34(8) : 188 - 192.

Li Q, Yao H Q. The research of air pollution treatment efficiency and its influencing factors in the Beijing - Tianjin - Hebei urban agglomeration[J]. Ecological Economy, 2018, 34(8) : 188 - 192.

[5] Estoque R C, Murayama Y, Myint S W. Effects of landscape composition and pattern on land surface temperature: An urban heat island study in the megacities of Southeast Asia[J]. Science of the Total Environment, 2017, 577 : 349 - 359.

[6] 欧阳晓,朱翔. 中国城市群城市用地扩张时空动态特征[J]. 地理学报, 2020, 75(3) : 571 - 588.

Ouyang X, Zhu X. Spatio - temporal characteristics of urban land expansion in Chinese urban agglomerations[J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(3) : 571 - 588.

[7] Ji J W, Wang S X, Zhou Y, et al. Spatiotemporal change and landscape pattern variation of eco - environmental quality in Jing - Jin - Ji urban agglomeration from 2001 to 2015[J]. IEEE Access, 2020, 8 : 125534 - 125548.

[8] 梁龙武,王振波,方创琳,等. 京津冀城市群城市化与生态环境时空分异及协同发展格局[J]. 生态学报, 2019, 39(4) : 1212 - 1225.

Liang L W, Wang Z B, Fang C L, et al. Spatiotemporal differentiation and coordinated development pattern of urbanization and the

ecological environment of the Beijing - Tianjin - Hebei urban agglomeration[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39 : (4) 1212 - 1225.

[9] 李平星,陈雯,邹露,等. 基于一体化生态空间格局的土地利用/覆被变化及其生态环境效应——以长三角为例[J]. 环境科学学报, 2021, 41(10) : 3905 - 3915.

Li P X, Chen W, Zou L, et al. Eco - environmental effect of land use/cover change (LUCC) based on integrated ecological space: A case of Yangtze River Delta[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, 41(10) : 3905 - 3915.

[10] 王渊,赵宇豪,吴健生. 基于 Google Earth Engine 云计算的城市群生态质量长时序动态监测——以粤港澳大湾区为例[J]. 生态学报, 2020, 40(23) : 8461 - 8473.

Wang Y, Zhao Y H, Wu J S. Dynamic monitoring of long time series of ecological quality in urban agglomerations using Google Earth Engine cloud computing: A case study of the Guangdong - Hong Kong - Macao Greater Bay Area, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(23) : 8461 - 8473.

[11] 方创琳,宋吉涛,张蔷,等. 中国城市群结构体系的组成与空间分异格局[J]. 地理学报, 2005, 60(5) : 827 - 840.

Fang C L, Song J T, Zhang Q, et al. The formation, development and spatial heterogeneity patterns for the structures system of urban agglomerations in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2005, 60(5) : 827 - 840.

[12] 王同达,曹锦雪,赵永华,等. 基于 PSR 模型的陕西省土地生态系统健康评价[J]. 应用生态学报, 2021, 32(5) : 1563 - 1572.

Wang T D, Cao J X, Zhao Y H, et al. Evaluation of land ecosystem health in Shaanxi Province, Northwest China based on PSR Model[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(5) : 1563 - 1572.

[13] 王晓君,吴敬学,蒋和平. 中国农村生态环境质量动态评价及未来发展趋势预测[J]. 自然资源学报, 2017, 32(5) : 864 - 876.

Wang X J, Wu J X, Jiang H P. Dynamic assessment and trend prediction of rural eco - environmental quality in China[J]. Journal of Natural Resources, 2017, 32(5) : 864 - 876.

[14] 牛彦合,焦胜,操婷婷,等. 基于 PSR 模型的城市多灾种风险评估及规划响应[J]. 城市发展研究, 2022, 29(4) : 39 - 48.

Niu Y H, Jiao S, Cao T T, et al. Urban multi - hazard risk assessment and planning response based on PSR model[J]. Urban Development Studies, 2022, 29(4) : 39 - 48.

[15] 孟岩,赵庚星,程晋南,等. 基于 MODIS 遥感数据和 GIS 的山东省生态环境状况评价[J]. 中国生态农业学报, 2008(4) : 1020 - 1024.

Meng Y, Zhao G X, Cheng J N, et al. Evaluation of the ecological environment of Shandong Province using MODIS data and GIS platform urban agglomeration[J]. Chinese Journal of Eco - Agriculture, 2008(4) : 1020 - 1024.

[16] 程晋南,赵庚星,李红,等. 基于 RS 和 GIS 的土地生态环境状况评价及其动态变化[J]. 农业工程学报, 2008, 24(11) : 83 - 88.

Cheng J N, Zhao G X, Li H, et al. Dynamic changes and evaluation of land ecological environment status based on RS and GIS technique[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(11) : 83 - 88.

- [17] 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.
Xu H Q, A remote sensing urban ecological index and its application[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(24): 7853 – 7862.
- [18] 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.
Song H M, Xue L. Dynamic monitoring and analysis of ecological environment in Weinan City, Northwest China based on RSEI model[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(12): 3913 – 3919.
- [19] 李 妍, 张国钦, 吝 涛, 等. 乡镇遥感生态指数时空变化及影响因素研究——以天津市蓟州区为例[J]. 生态学报, 2022, 42(2): 474 – 486.
Li Y, Zhang G Q, Lin T, et al. The spatiotemporal changes of remote sensing ecological index in towns and the influencing factors: A case study of Jizhou District, Tianjin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(2): 474 – 486.
- [20] 王士远, 张学霞, 朱 彤, 等. 长白山自然保护区生态环境质量的遥感评价[J]. 地理科学进展, 2016, 35(10): 1269 – 1278.
Wang S Y, Zhang X X, Zhu T, et al. Assessment of ecological environment quality in the Changbai Mountain Nature Reserve based on remote sensing technology[J]. Progress in Geography, 2016, 35(10): 1269 – 1278.
- [21] 何盈利, 尤南山, 崔耀平, 等. 2000 年来中国生态状况时空变化格局[J]. 自然资源学报, 2021, 36(5): 1176 – 1185.
He Y L, You N S, Cui Y P, et al. Spatio-temporal changes in remote sensing-based ecological index in China since 2000[J]. Journal of Natural Resources, 2021, 36(5): 1176 – 1185.
- [22] 付东杰, 肖 寒, 苏奋振, 等. 遥感云计算平台发展及地球科学应用[J]. 遥感学报, 2021, 25(1): 220 – 230.
Fu D J, Xiao H, Su F Z, et al. Remote sensing cloud computing platform development and earth science application laborative innovation community[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2021, 25(1): 220 – 230.
- [23] 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.
Zheng Z H, Wu Z F, Chen Y B, et al. Analyzing the ecological environment and urbanization characteristics of the Yangtze River Delta Urban Agglomeration based on Google Earth Engine[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(2): 717 – 729.
- [24] 张 华, 宋金岳, 李 明, 等. 基于 GEE 的祁连山国家公园生态环境质量评价及成因分析[J]. 生态学杂志, 2021, 40(6): 1883 – 1894.
Zhang H, Song J Y, Li M, et al. Eco-environmental quality assessment and cause analysis of Qilian Mountain National Park based on GEE[J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(6): 1883 – 1894.
- [25] Guo B B, Fang Y L, Jin X B, et al. Monitoring the effects of land consolidation on the ecological environmental quality based on remote sensing: A case study of Chaohu Lake Basin, China[J]. Land Use Policy, 2020, 95(C): 104569.
- [26] Shan W, Jin X B, Ren J, et al. Ecological environment quality assessment based on remote sensing data for land consolidation[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 239: 118126.
- [27] Yue H, Liu Y, Li Y, et al. Eco-environmental quality assessment in China's 35 Major Cities based on remote sensing ecological index[J]. IEEE Access, 2019, 7: 51295 – 51311.
- [28] 杨江燕, 吴 田, 潘肖燕, 等. 基于遥感生态指数的雄安新区生态质量评估[J]. 应用生态学报, 2019, 30(1): 277 – 284.
Yang J Y, Wu T, Pan X Y, et al. Ecological quality assessment of Xiongan New Area based on remote sensing ecological index[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(1): 277 – 284.
- [29] 杭 鑫, 罗晓春, 曹 云, 等. 基于 RSEI 模型的生态质量评估及城镇化影响——以南京市为例[J]. 应用生态学报, 2020, 31(1): 219 – 229.
Hang X, Luo X C, Cao Y, et al. Ecological quality assessment and the impact of urbanization based on RSEI model for Nanjing, Jiangsu Province, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(1): 219 – 229.
- [30] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116 – 134.
Wang J F, Xu C D. Geodetector: Principle and prospective[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 116 – 134.
- [31] 欧阳晓, 朱 翔, 贺清云. 基于生态系统服务和生态系统健康的生态风险评价——以长株潭城市群为例[J]. 生态学报, 2020, 40(16): 5478 – 5489.
Ouyang X, Zhu X, He Q Y. Incorporating ecosystem services with ecosystem health for ecological risk assessment: Case study in Changsha – Zhuzhou – Xiangtan urban agglomeration, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(16): 5478 – 5489.
- [32] He Y H, Lin Y, Zhou G H, et al. Spatial pattern and drivers of urbanization in China's mid-level developing urban agglomeration: A case study of Chang – Zhu – Tan[J]. Regional Sustainability, 2021, 2(1): 83 – 97.
- [33] 施婷婷, 徐涵秋, 唐 菲. 经济快速增长区建筑用地变化及其对生态质量的影响——以福建晋江为例[J]. 应用生态学报, 2017, 28(4): 1317 – 1325.
Shi T T, Xu H Q, Tang F. Built-up land change and its impact on ecological quality in a fast-growing economic zone: Jinjiang County, Fujian Province, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(4): 1317 – 1325.
- [34] Xu H Q, Wang Y F, Guan H D, et al. Detecting ecological changes with a remote sensing based ecological index (RSEI) produced time series and change vector analysis[J]. Remote Sensing, 2019, 11(20): 2345.
- [35] Aditya F, Gusmayanti E, Sudrajat J. Rainfall trend analysis using Mann-Kendall and Sen's slope estimator test in West Kalimantan[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 893(1): 012006.
- [36] 杨素英, 孙风华, 马建中. 增暖背景下中国东北地区极端降水事件的演变特征[J]. 地理科学, 2008, 28(2): 224 – 228.
Yang S Y, Sun F H, Ma J Z. Evolvement of precipitation extremes in Northeast China on the background of climate warming[J]. Scientia Geographica Sinica, 2008, 28(2): 224 – 228.
- [37] Wang J F, Li X H, Christakos G, et al. Geographical detectors – based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun Region, China[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2010, 24(1): 107 – 127.
- [38] 孔玲玲, 冯险峰, 武 爽, 等. 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[J]. 地理科学进展,2022,41
(3):437-450.
Kong L L, Feng X F, Wu S, et al. Spatiotemporal dynamics and

driving factor analysis of ecological quality change in the Lhasa urban circle from 1994 to 2017[J]. Progress in Geography,2022,41
(3):437-450.

Spatio – temporal evolution and influencing factors of ecological environment quality in the Changsha – Zhuzhou – Xiangtan urban agglomeration

LI Guangzhe^{1,2}, WANG Hao^{1,2}, CAO Yinxuan², ZHANG Xiaoyu², NING Xiaogang^{1,2}
(1. College of Geodesy and Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2. Chinese Academy of Surveying & Mapping, Beijing 100036, China)

Abstract: Accurately identifying the evolutionary trend and influencing factors of ecological environment quality in new urban agglomerations holds crucial significance for scientifically guiding urbanization and achieving sustainable development. Existing research on the spatio – temporal evolutionary characteristics of ecological environment quality in new urban agglomerations ignored the interactions of multiple factors on ecological environment quality. Based on the Google Earth Engine (GEE) platform, and long – time – series Landsat TM/OLI remote sensing images as the fundamental data source, this study delved into the spatio – temporal variations of ecological environment quality in the Changsha – Zhuzhou – Xiangtan urban agglomeration from 1990 to 2020 using methods including the remote sensing ecological index (RSEI), Sen’s slope estimator, and Mann – Kendall test. Moreover, the geographical detector was employed to quantitatively measure the effects of various factors on the urban agglomeration’s spatial heterogeneity. The results indicate that the Changsha – Zhuzhou – Xiangtan urban agglomeration exhibited generally high ecological environment quality, with a spatial distribution pattern of higher quality in marginal areas and lower quality in core areas. The average proportion of areas with ecological environment quality graded as “excellent” and “good” exceeds 60% in the urban agglomeration. The sustainable development strategy altered the urban sprawl in this urban agglomeration, leading to a decline followed by an increase in RSEI, with an inflection point in 2000. From 1990 to 2020, the ecological environment quality significantly deteriorated in central urban areas while improvement was observed in non – central urban areas. Physical and geographical conditions significantly influenced the ecological environment quality of the urban agglomeration in the early stages. With socio – economic progression, the influence of socio – economic factors like nighttime lighting on ecological environment quality gradually intensified, assuming a dominant role over time. Besides, the interactions among factors significantly enhanced the effects of individual factors on ecological environment quality. Before 2010, the interactions between human and natural factors exerted considerable influences on the ecological environment. After 2015, the interactions among human factors yielded more pronounced effects on ecological environment quality. These findings serve as a foundational guide for the integrated high – quality development of the Changsha – Zhuzhou – Xiangtan urban agglomeration and a reference for the advancement of other comparable urban agglomerations.

Keywords: Changsha – Zhuzhou – Xiangtan urban agglomeration; Google Earth Engine; remote sensing ecological index; geographical detector; ecological environment quality

(责任编辑: 李 瑜)