

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2025.01.041; CSTR:32311.14.rswc.2025.01.041.

权文婷, 周辉, 王卫东, 等. 2000—2023 年关中平原城市群生态环境质量动态特征[J]. 水土保持研究, 2025, 32(1): 336-346, 357.

Quan Wenting, Zhou Hui, Wang Weidong, et al. Characteristics of ecological environment quality dynamic of the urban agglomeration in Guanzhong Plain from 2000 to 2023[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(1): 336-346, 357.

2000—2023 年关中平原城市群生态环境质量动态特征

权文婷^{1,2}, 周辉², 王卫东², 张煦庭², 赵青兰², 王旭东², 陈军¹

(1. 西安交通大学 人居环境与建筑工程学院, 西安 710049; 2. 陕西省农业遥感与经济作物气象服务中心, 西安 710016)

摘要: [目的] 掌握关中平原城市群的生态环境质量, 优化城市格局和建设生态文明, 进行生态环境变化动态监测。 [方法] 基于 GEE 云平台, 运用 2000—2023 年 MODIS 数据集, 构建遥感生态指数 (RSEI), 分析了关中平原城市群生态环境质量的空间分异性特征、演变趋势及未来发展动态, 并探讨了影响生态环境质量的关键因素及其交互作用。 [结果] (1) 关中平原城市群的 RSEI 整体呈上升趋势, RSEI 均值增长率为 0.005 3/a, 各市之间 RSEI 时空演变存在差异; (2) 近 24 年来, 关中平原城市群生态环境质量虽有改善, 但优质区域有限且呈下降趋势; (3) 关中平原城市群的生态环境质量主要受城市活动强度和坡度两个主导因子的影响, 同时降水与土地利用的交互作用在多数年份中对生态环境质量的演变具有决定性影响。 [结论] 关中平原城市群的生态环境质量受到多种因素的影响, 其中城市活动强度和坡度是主要因素, 降水与土地利用的交互作用也起到了重要作用。为了维护和提升关中平原城市群的生态质量, 应考虑在城市规划中融入生态保护措施。

关键词: 关中平原城市群; 遥感生态指数; GoogleEarthEngine; 生态环境质量

中图分类号: X826; X87

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2025)01-0336-11

Characteristics of ecological environment quality dynamic of the urban agglomeration in Guanzhong Plain from 2000 to 2023

Quan Wenting^{1,2}, Zhou Hui², Wang Weidong², Zhang Xuting²,
Zhao Qinglan², Wang Xudong², Chen Jun¹

(1. School of Human Settlements and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. Shaanxi Meteorological Service Center of Agricultural Remote Sensing and Economic Crop, Xi'an 710016, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to timely grasp the ecological environment quality of the Guanzhong Plain urban agglomeration, to optimize the urban layout, and to build a civilization of ecological progress. [Methods] The Google Earth Engine (GEE) platform and MODIS dataset from 2000 to 2023 were utilized to construct a Remote Sensing Ecological Index (RSEI). The spatial variations, evolution trends, and future prospects of the ecological environment in the Guanzhong Plain urban agglomeration were analyzed. Additionally, the geographic detector was employed to examine the influencing factors and their interactions on ecological environment quality. [Results] (1) Over the past 24 years, the overall RSEI of the Guanzhong Plain urban agglomeration had shown an increasing trend, with an average growth rate of 0.005 3/a. There were spatial-temporal variations in the RSEI evolution among different cities. In terms of spatial distribution, the ecological environment quality was lower in the Loess Plateau and rapidly urbanizing areas, while the vegetation-rich forest areas such as the Qinba Mountain maintained a higher level of ecological environment quality due to the comprehensive benefits of biodiversity conservation, water source conservation, and atmospheric environment

收稿日期: 2024-04-01

修回日期: 2024-04-16

资助项目: 陕西省重点产业创新链项目(2022ZDLSF06-09); 国家重点研发计划项目(2018YFB0504800); 陕西省气象局秦岭和黄土高原生态环境气象重点实验室开放研究基金课题(2022G-23)

第一作者: 权文婷(1985—), 女, 陕西宝鸡人, 硕士, 副高级工程师, 主要从事生态环境和农业遥感监测评价研究。E-mail: quanwenting@163.com

<http://stbcjy.paperonice.org>

protection. (2) Although there had been improvement in the ecological environment quality of the Guanzhong Plain urban agglomeration over the past 24 years, the proportion of high-quality areas was limited and showed a declining trend. The urbanization process had led to damage to the ecological systems in the central urban agglomerations, with the increased energy consumption, water scarcity, and pollution negatively impacting ecosystem stability. The targeted measures for ecological environment protection should be taken to address the specific needs and challenges of different regions. (3) The ecological environment quality of the Guanzhong Plain urban agglomeration was influenced by two dominant factors: urban nighttime lighting and slope. The former revealed a significant association between human activities and environmental effects such as resource consumption and carbon emissions. The latter directly impacted regional ecological stability by altering soil erosion, water conservation, and vegetation distribution patterns. The combined effects of these factors shaped the complex current state of the ecological environment. The interaction between precipitation and land use played a decisive role in the evolution of ecological environment quality in most years. [Conclusion] To maintain and enhance the ecological quality of the Guanzhong Plain urban agglomeration, integrating ecological conservation measures into urban planning should be considered.

Keywords: Guanzhong Plain urban agglomeration; remote sensing ecological index; Google Earth Engine; ecological environment quality

在全球工业化和城镇化加速推进背景下,城市群已经成为中国区域经济发展的关键推动力^[1],城市群突破传统行政区划束缚,逐步构建起以大型城市为核心依托、中小型城市为发展重点的空间格局,并发挥辐射带动作用^[2-3]。但在城市化进程中,由于城市人口扩张、城市规模扩大挤占了农用地及生态用地,生态环境面临大气污染、气候变化、水资源短缺等一系列问题和挑战^[4-6]。针对上述问题,国内外学者对于城市群与生态环境发展进行监测评价,探讨城市群建设过程中生态环境变化相关课题,国外对于土地利用变化背景下生态环境质量的时空变化^[7]、城市群在不同发展水平国家中对生态环境质量的不同影响等^[8]科学问题进行了探讨;国内对于京津冀城市群、长三角城市群、粤港澳大湾区^[9-12]国家级城市群,也开展了大量生态环境与城市化推进相关研究。

在推进“一带一路”建设背景下,关中平原城市群是中国向西开放的战略支点,2018年1月9日,国务院正式批准了《关中平原城市群发展规划》,2018年2月7日,国家发展改革委、住房城乡建设部联合印发《关中平原城市群发展规划》,强调要构建与资源环境承载能力相适应的空间格局。关中平原城市群地处黄土高原南缘,水土流失严重,土壤侵蚀问题突出,生态环境脆弱。同时,以发挥中心城市辐射带动作用为目标,关中平原城市群处于全力推进城市群建设的关键阶段,面临的生态环境问题也同样突出,水资源短缺、大气污染严重、生态服务功能低等。生态环境保护和改善对城市群在降低自然灾害风险、促进可持续发

展、保障公共健康等诸多方面都具有重大意义^[13-14],持续监测城市群生态环境质量对城市可持续发展至关重要。相对于其他国家级城市群,现有研究对于关中平原城市群生态环境质量评价研究较少,多集中在三生空间生态环境效应评估^[6]、耦合视角的城市—环境协调发展等^[15],缺乏时空变化角度下生态环境空间格局演变整体评估相关研究。

在评价生态环境质量方面,现有研究多采用生态足迹法、生态系统服务价值评估、景观指数、生态承载力等。生态足迹方法可以直观显示人类活动对生态系统的影响,但评估范围有限且需要大量数据;生态系统服务价值评估可将经济价值量化,反映生态效益,但数据获取困难且价值量化存在主观性;景观指数可反映景观格局和生态过程,但需要专业知识解释且无法全面反映生态环境质量;生态承载力可以评估地区生态支持的能力,但承载力的阈值具有不确定性。徐涵秋在传统生态环境指数(Ecological Index, EI)的基础上,提出遥感生态指数(Remote Sensing Ecological Index, RSEI)^[16],该指数完全基于遥感数据获取绿度、湿度、干度、热度信息,在此基础上构建指数。相较于传统的EI, RSEI呈现为多维度生态信息的综合,数据易获取且在时空上具备连续性,可进行大范围动态监测,这使得RSEI成为生态环境质量遥感监测与评估的有力工具,除了应用于城市区域,在水土流失区、国家自然保护区、湿地、干旱荒漠区、水电开发区等均有广泛应用。在应用的空间尺度上,除了前文提到的城市群,在省级、市级、区县级都

有学者开展相关研究。但在大范围、长时序监测应用中,遥感影像存在受云干扰且预处理和指标计算工作量等问题。Google Earth Engine(GEE)是一个利用高性能计算资源处理大量数据集的平台,拥有开放的海量数据资源,在处理大量遥感数据中具备突出优势^[17]。近年来,GEE 平台成为国内外学者进行长时序遥感监测评估的重要技术手段^[18],相较于传统遥感技术,GEE 平台对于城市群这样大范围的研究对象,进行长时序监测评估具备显著优势。

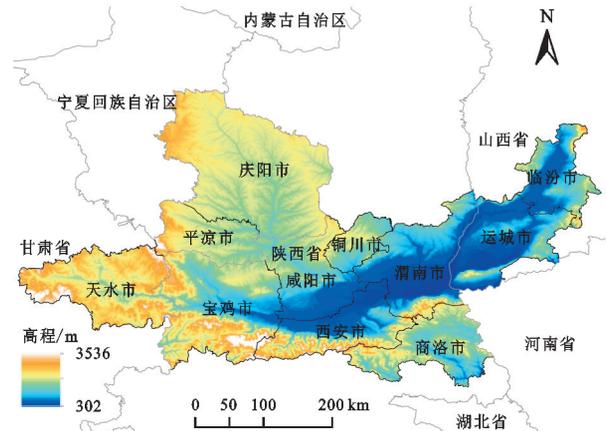
基于此,本文基于 GEE 平台,采用 2000—2023 年 MODIS 产品计算关中平原城市群 RSEI,实现了关中平原城市群 24 年间生态环境质量的长时序监测评估,运用 Sen+MK 趋势分析及检验法进行趋势分析,结合 Hurst 指数对关中平原城市群生态环境质量未来趋势进行可视化分析,揭示了不同区域生态环境质量的差异化演变趋势,利用地理探测器定量分析单影响因子及双影响因子的交互作用,以期对关中平原城市群可持续发展提供理论和决策依据。

1 研究区与研究方法

1.1 研究区概况

关中平原城市群(105°—110°E, 33°—35°N,)是以西安为中心的国家级城市群,位于我国内陆中心,是西部地区面向中东部地区的重要门户。关中平原城市群涵盖陕西、山西、甘肃三省的部分地区(图 1),总面积 10.71 万 km²,总人口 3 863 万人。关中平原城市群地处暖温带半湿润大陆性季风气候区,年均气温在 9~14 °C,年均降水量在 400~800 mm。从地理形势上看,关中平原城市群位于秦岭山脉以北、黄土高原南缘,地势平坦开阔,呈现典型

的冲积平原地貌特征。关中平原城市群是黄河流域生态建设和高水平发展的战略核心地带,生态环境相对脆弱,在工业化和城市化进程的双重夹击下,面临水资源短缺、土地沙化、空气污染及生态系统负荷加重等多重困境。近年来,政府实施了多项政策与措施以缓解生态系统压力,但在城市化进程持续加快背景下,城市用地扩张与生态环境质量之间的矛盾依然突出,应予以持续关注和研究。



注:基于标准地图服务系统下载的审图号 GS(2022)4308 号的标准地图制作,底图未做修改,下图同。

图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of the study area

1.2 数据来源及预处理

本文所用数据如表 1 所示,遥感数据采用 MODIS 数据集产品,基于 GEE 平台对数据集进行拼接裁剪、滤云并选取 2000—2023 年 6—9 月植被生长旺盛季节的影像产品,采用归一化水体指数对研究区水体进行掩膜处理。其他数据根据研究目的分为自然因素和人为因素,包括 DEM 数据、坡度数据、年均气温、年降水量,以及国内生产总值、人口、土地利用、夜间灯光数据。

表 1 数据类型及来源

Table 1 Data types and sources

数据名称	数据介绍	数据来源	
MODIS	MOD09A1	MODIS 系列遥感产品(GEE 平台)	
	MOD11A2		
	MOD13A1		
土地利用数据	MCD12Q1	地理空间数据云 Geospatial Data Cloud(https://www.gscloud.cn/)	
DEM	SRTMDEM90 m 高程数据集		
	坡度	研究区坡度数据	基于 DEM 数据制作
	人口数据	1 km×1 km 人口密度格网数据	世界人口数据网站 worldpop(https://www.worldpop.org/)
	国内生产总值数据	1 km×1 km 国内生产总值格网数据	中国科学院资源环境数据中心(https://www.resdc.cn/)
气象数据	年均气温	国家地球系统科学数据中心 (https://www.geodata.cn)	
	年降水量		
夜间灯光数据	DMSP/OLS 和 NPP/VIRRS 数据	GEE 平台	
矢量数据	全国省/市行政区划边界数据	中国科学院资源环境数据(https://www.resdc.cn/)	

1.3 研究方法

1.3.1 遥感生态指数 遥感生态指数(RSEI)选取绿

度、湿度、热度、干度这 4 个重要指标建立函数,上述 4 个指标依次采用植被指数、湿度分量、地表温度和

裸土指数来代表^[16]。

绿度指标采用 NDVI 反映研究区植被生长状况,在 RSEI 模型中,绿度指标的提升通常指示着植被生长状况的改善,健康的植被有助于碳固定、大气净化以及生物多样性维护等重要生态功能,绿度指标的增长可被视为生态环境质量提升的正面指标^[19],通过 MOD13A1 V6.1 中的 NDVI 产品得到。

湿度指标可以反映研究区土壤和植被的湿度,与生态密切相关。在 RSEI 模型中,湿度指标的提升对生态环境的改善至关重要,它确保了生物所需水分的供应,从而促进生态系统的稳定与健康发展^[20]。湿度指标采用 MOD09A1 产品通过缨帽变化计算得到,公式为:

$$\begin{aligned} \text{WET} = & 0.1147 \times \rho_1 + 0.2489 \times \rho_2 + 0.2408 \times \rho_3 + \\ & 0.3132 \times \rho_4 - 0.3122 \times \rho_5 - 0.6416 \times \rho_6 - \\ & 0.5087 \times \rho_7 \end{aligned} \quad (1)$$

式中: ρ_1 — ρ_7 分别为 MOD09A1 产品的红光、近红外、蓝光、绿光、近红外 2,短波红外 1 和短波红外 2 波段。

热度指标采用地表温度代表,反映了地表与大气之间的热量交换,是评估地表能量平衡状况的重要参数,采用 MOD11A2 产品计算得到。在 RSEI 模型中,地表温度的升高表明存在热岛效应或干旱情况,这些现象可能对生态环境造成不利影响,例如加剧水资源短缺和生物多样性的减少^[21]。将灰度值转为摄氏温度的公式为:

$$\text{LST} = 0.02 \times \text{DN} - 273.5 \quad (2)$$

式中:DN 为产品的灰度值。

干度指标采用归一化建成区指数(NDBSI)代表,综合了裸土指数(SI)和建筑指数(NDBI)的影响,反映了地表的干化程度。在 RSEI 模型中,干度指标的提升通常与生态环境质量的下降相联系,可能导致土壤退化、植被死亡,以及生态系统功能的丧失。干度指标的公式为:

$$\text{SI} = \frac{(\rho_6 + \rho_1) - (\rho_2 + \rho_3)}{(\rho_6 + \rho_1) + (\rho_2 + \rho_3)} \quad (3)$$

$$\text{IBI} = \frac{2\rho_6}{\rho_6 + \rho_2} - \left(\frac{\rho_2}{\rho_2 + \rho_1} + \frac{\rho_4}{\rho_4 + \rho_6} \right) \quad (4)$$

$$\text{NDBSI} = \frac{\text{SI} + \text{IBI}}{2} \quad (5)$$

式中: ρ_1 — ρ_6 分别为 MOD09A1 产品的红光、近红外、蓝光、绿光、近红外 2,短波红外 1 波段。

将上述 4 个指标进行归一化处理,经主成分分析、归一化处理,得到最终的 RSEI,公式为:

$$\text{RSEI}_0 = \text{PC1}[f(\text{NDVI}, \text{LST}, \text{WET}, \text{NDBSI})] \quad (6)$$

$$\text{RSEI} = \frac{\text{RSEI}_0 - \text{RSEI}_{0\min}}{\text{RSEI}_{0\max} - \text{RSEI}_{0\min}} \quad (7)$$

式中:PC1 为主成分分析后第一主成分; $\text{RSEI}_{0\min}$ 和 $\text{RSEI}_{0\max}$ 分别为 RSEI_0 的最小值和最大值。当对生态环境质量起正面影响的绿度和湿度指标在 PC1 的载荷是负值,而起负面影响的干度和热度在 PC1 的载荷为正值时,通过 $1 - \text{PC1}$ 进行还原^[22]。

1.3.2 Sen + Mann-Kendall 趋势分析 采用 Sen + Mann-Kendall 趋势分析法对 2000—2023 年关中平原城市群 RSEI 进行趋势分析,探讨生态环境质量变化的时空特征。Sen 斜率估算与 Mann-Kendall 显著性检验相结合是一种非参数统计方法,相较于传统的回归分析法,该方法的优点是不需要数据服从正态分布,也不要求趋势是线性的,并且不受异常值和缺失值的影响,适用于长时间序列数据的趋势分析,计算方法见文献^[23]。

1.3.3 Hurst 指数 采用 Hurst 指数以描述研究区 RSEI 生态质量的未来变化趋势,当 $0.5 < \text{Hurst} < 1$ 时,表明 RSEI 未来趋势与过去一致,且 Hurst 越接近 1, RSEI 的持续性越强;当 $0 < \text{Hurst} < 0.5$ 时,表明 RSEI 未来趋势与过去相反,且 Hurst 越接近 0, RSEI 的反持续性越强。当 $\text{Hurst} = 0.5$ 时,表明 RSEI 变化趋势不显著。

1.3.4 地理探测器 运用地理探测器分析关中平原城市群生态环境质量变化的影响因子以及各因子之间的相互作用关系。地理探测器是由王劲峰等^[24]开发的用于揭示地理现象空间分异性及其背后驱动因子的统计方法,有因子探测、交互探测、生态探测和风险探测 4 个模块。本文采用因子探测分析 RSEI 变化的主导因子,采用交互探测来分析两个因子共同作用对 RSEI 变化的解释力。其中,q 值用于量化单个因子对地理现象空间分异性的解释力,q 值范围是 0~1, q 值越大,解释力越强;p 值代表该因子对地理现象空间分异性的显著性, p 值越小,说明该因子对地理现象的影响越显著,即该因子在空间分异性上的解释力越强^[25]。

2 结果与分析

2.1 生态环境质量时空格局

2.1.1 关中平原城市群生态环境质量时间变化 利用 GEE 平台计算得到研究区内 2000—2023 年 RSEI 年均值,图 2 为其变化趋势及拟合结果,RSEI 年均值整体生态质量呈上升趋势,2001 年 RSEI 均值最低为 0.389,2022 年 RSEI 均值达到最高 0.621,增幅为 59.6%,

2000—2023 年研究区 RSEI 均值增长率为 0.005 3/a。

图 3 为 2000—2023 年研究区各市 RSEI 箱线图,大部分城市的 RSEI 中位数集中在 0.5~0.6,关中平原城市群多数城市的生态环境质量处于中等水平且相对稳定,其中箱线图的中位数最小为庆阳 0.4,最大为商洛 0.66,表明近 24 年庆阳的生态环境质量整体水平较差,商洛较好。临汾、西安、渭南、平凉箱体四分位距较小,表明生态环境质量随时间波动较小;天水、宝鸡、商洛、庆阳箱体四分位距较大,表明这些城市 RSEI 年际间波动较大。西安、宝鸡、商洛等市箱线图的须线较长,表明上述城市 RSEI 变化存在极端情况。市级单元下 RSEI 年均值年际变化存在差异,RSEI 均值最小值在 0.217~0.422 间波动,最大值在 0.535~0.735,增幅在 26.7%~238.56%,最小值为 2001 年西安,最大为 2022 年商洛。2000—2023 年市级单元 RSEI 均值增长率来看,陕西宝鸡、商洛、西安,山西临汾,甘肃平凉、庆阳、天水和都高于均值(0.003 0/a),最高为甘肃天水 0.005 2/a,最低为陕西渭南 0.000 4/a。

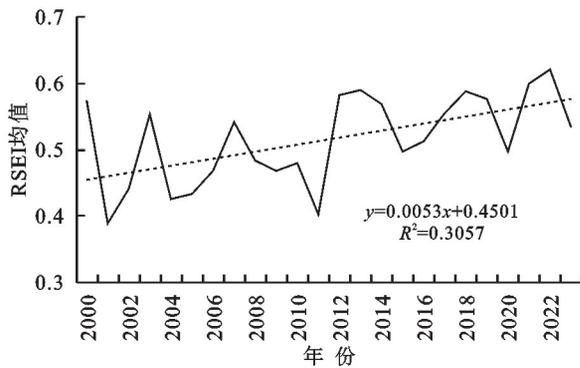


图 2 2000—2023 年研究区内 RSEI 均值逐年变化

Fig. 2 The annual change of the mean RSEI in the study area from 2000 to 2023

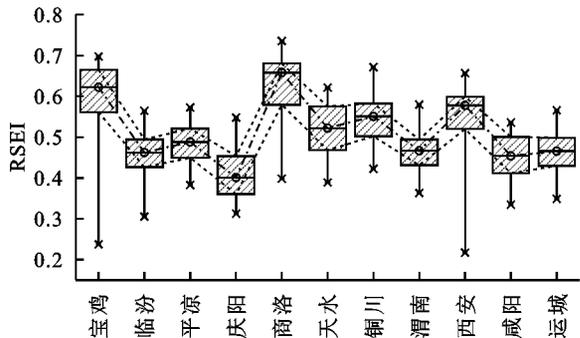


图 3 2000—2023 年研究区各市 RSEI 箱线图

Fig. 3 Boxplot of RSEI across cities in the study area from 2000 to 2023

不同城市的 RSEI 存在差异,与其发展水平、治理力度、地形气候等因素密切相关^[26]。例如,宝鸡和商洛在生态环境治理方面取得了较好的成果。宝鸡市实施了一系列生态环境治理工程,如治理小流域、退耕还林还

草等,有效改善了生态环境;商洛通过加强森林资源保护、推进农村人居环境整治等措施,提升了生态环境质量。而渭南在工业发展和城市化进程中,生态环境治理相对滞后,渭南工业结构以重工业为主,污染较重,导致生态环境质量改善缓慢。庆阳地处黄土高原,水土流失严重,且该地区降水分布不均,干旱少雨,植被生长困难,生态环境质量容易受到自然条件的影响,年际波动大且生态环境质量整体水平较差。

2.1.2 关中平原城市群生态环境质量空间变化 对研究区生态环境质量进行分类,以 0.2 为间隔将其划分为差($0 \leq RSEI \leq 0.2$)、较差($0.2 < RSEI \leq 0.4$)、中等($0.4 < RSEI \leq 0.6$)、良($0.6 < RSEI \leq 0.8$)和优($0.8 < RSEI \leq 1$)5 个等级。以 5 a 为间隔,图 4 展示了 2003 年、2008 年、2013 年、2018 年、2023 年关中平原城市群生态环境质量等级分布。从空间分布看,关中平原城市群生态环境质量等级差和较差主要分布在西北部、西部和中部,西北部为甘肃庆阳北部环县大部区域,该县地处毛乌素沙漠边缘,属于黄土高原丘陵沟壑区,土壤风蚀和沙化严重,植被覆盖度低,生态环境质量常年较差。西部为甘肃天水西部甘谷县和武山县,地处甘肃东南部,属于温带大陆性季风气候,降水量低且分布不均匀,属于半干旱区或干旱区,植被覆盖较低。中部生态环境质量等级较差区域主要为城市群区域,城市化发展伴随着土地开发和资源消耗,此外城市群人口密集,工业和经济活动集中,均导致该区域生态环境质量差。生态环境质量良和优的区域主要分布在秦巴山区、庆阳子午岭林区、天水小陇山林区等地,这些区域植被覆盖度高、生物多样性丰富、人为干预少,生态环境质量等级一直在良以上。2000—2023 年,研究区生态环境质量总体表现为在转好—变差之间波动,南部生态环境质量等级良和优的区域呈减少态势。

统计 2000—2023 年研究区生态环境各等级面积及所占比例(图 5),等级在中等以上平均面积比例达 69.5%,等级中等面积占比最大,等级优和差占比均较小。2000—2023 年等级中等、良、优面积比例呈增加趋势(年增长率分别为 0.366 2/a,0.288 5/a,0.273 3/a),差和较差呈减少趋势(年增长率分别为 -0.901 6/a, -0.286 7/a)。表明关中平原城市群生态环境质量状况尚可且向好发展,但等级为优的生态环境质量面积占比较少,且近 5 年呈减少趋势。

2.1.3 关中平原城市群生态环境质量演变趋势 利用 Sen 斜率得到 2000—2023 年关中平原城市群生态环境质量变化率空间分布图(图 6),将 Sen 斜率结合 MK 检验的结果划分为 5 个等级,得到 RSEI 演变趋势空间分布。

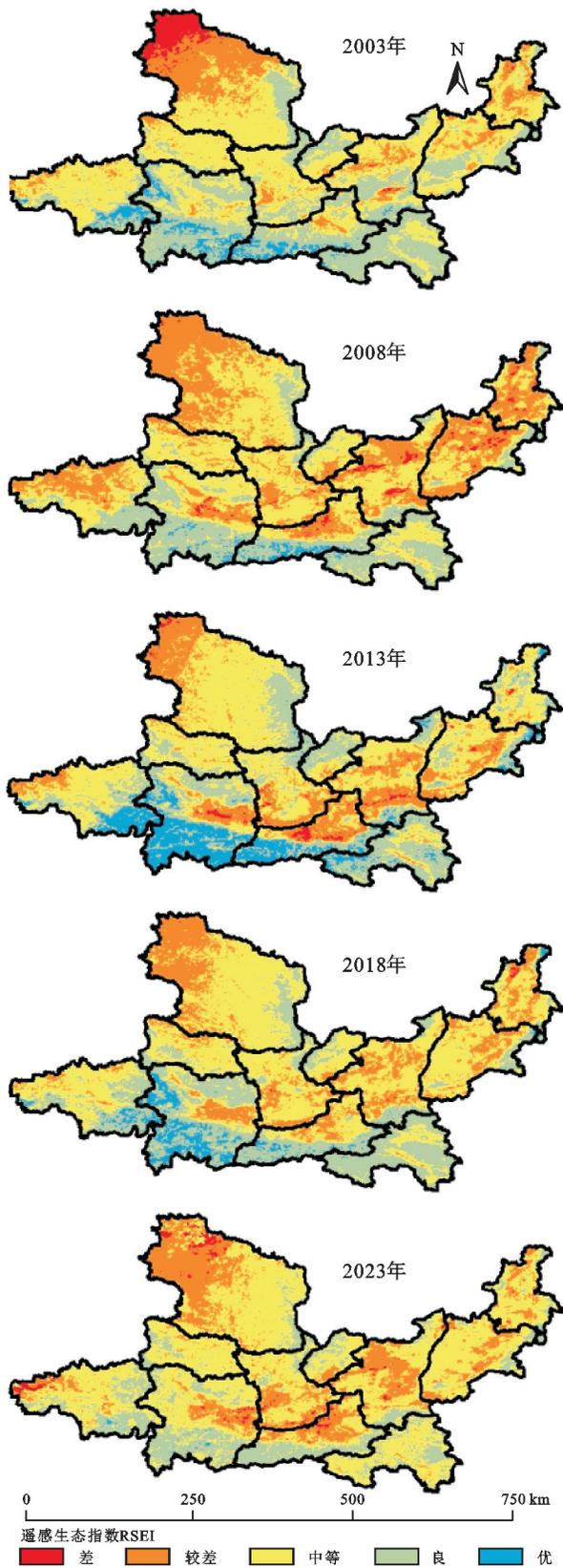


图 4 2000—2023 年关中平原城市群生态环境质量空间分布

Fig. 4 The spatial distribution of ecological and environmental quality in the Guanzhong Plain Urban Agglomeration from 2000 to 2023

其中, Z 值为 MK 非参数检验的统计量, 用于判断 RSEI 时间序列是否存在显著的趋势变化, Z 值的正负

表示 RSEI 变化的趋势方向, 正值表示 RSEI 呈上升趋势, 负值表示下降趋势。 Z 值的绝对大小与趋势的显著性相关, 绝对值越大表示趋势的显著性越高。 大部分区域的 RSEI 以 $0 \sim 0.002/a$ 的速率上升, 面积占比为 41.42%, 有 25.63% 区域的 RSEI 以 $0.002 \sim 0.004/a$ 的速率上升, 表明研究区整体生态环境质量呈向好趋势。 RSEI 下降的区域主要集中在陕西宝鸡凤翔区、岐山县和扶风县等地的中心城区。 不同地区的 RSEI 演变趋势存在明显空间差异。 2000—2023 年, 生态严重退化和轻微退化的面积各占 0.06% 和 10.41%, 主要集中在研究区的中心城市区域, 受人口密集、城市扩张等影响, 生态质量常年较差且呈退化趋势。 生态轻微改善和明显改善的面积各占 66.94% 和 1.15%, 主要集中在城市群以外的山区林区。 生态环境稳定不变的区域主要集中在中心城市外围的郊区, 受城市发展进程影响较小, 生态环境质量改善不大。

2.2 生态环境质量稳定性及未来趋势的空间格局

从 2000—2023 年研究区 Hurst 指数空间分布 (图 7A) 可知, Hurst 指数均值为 0.56, 以持续性为主。 Hurst 指数 < 0.5 的面积占比为 23.36%, 为反持续性, 表明 RSEI 未来变化与近 24 年演变趋势相反, 主要集中在研究区各市中心城市群及其外围区域。 Hurst 指数 > 0.5 的面积占比为 76.64%, 表明 RSEI 未来变化趋势与近 24 年演变趋势一致, 主要集中在除城市群外的山区林地、耕地、园地等区域。

将 Hurst 指数空间分布与 RSEI 变化率空间分布相叠加, 得到研究区 RSEI 未来变化趋势分布 (图 7B), 持续退化区域面积占比 4.88%, 主要分布在陕西西安、咸阳、渭南、宝鸡, 以及山西运城和临汾等城市的中心城区区域, 表明随着城市化进程所带来的人口聚集、城市建设、环境污染等问题, 会持续影响生态环境进一步退化。 由改善变为退化面积占比 6.07%, 主要集中在甘肃庆阳, 陕西西安鄠邑、长安、周至, 咸阳淳化、泾阳、永寿, 渭南澄城、蒲城、临渭, 山西运城盐湖、芮城, 临汾襄汾、洪洞等地, 这部分区域多处于积极推进城市化和城镇化区域协调发展阶段, 未来可能会带来因工业活动和人口密度增加带来的环境污染, 以及资源消耗增加等多方面问题, 导致生态环境质量发生改善—退化的改变。 持续改善面积占比 62.03%, 主要分布在除城市群、林区外的大部分区域, 包括了农业、生态用地等, 这部分区域受城市化进程影响较小, 生态环境具有更大改善空间。 由退化变为改善面积占比 5.59%, 主要集中在研究区中部和南部, 这部分区域土地利用类型多为农用地和林地, 可能为由荒地开垦和退耕还林、荒漠化治理等带来的农用地和林地增

加,进而对生态环境改善带来正面影响。未来持续不变面积占比 21.43%,主要为城镇外围郊区和秦巴山地、渭北平原退耕还林区,以及中条山林区、吕梁山林区、庆阳子午岭林区等地,生态环境质量较为稳定。

关中平原城市群生态环境质量未来变化趋势表明,在城市化进程中应加强环境保护措施,对农用地和林地进行合理利用和保护,以实现生态环境质量的持续改善和稳定。

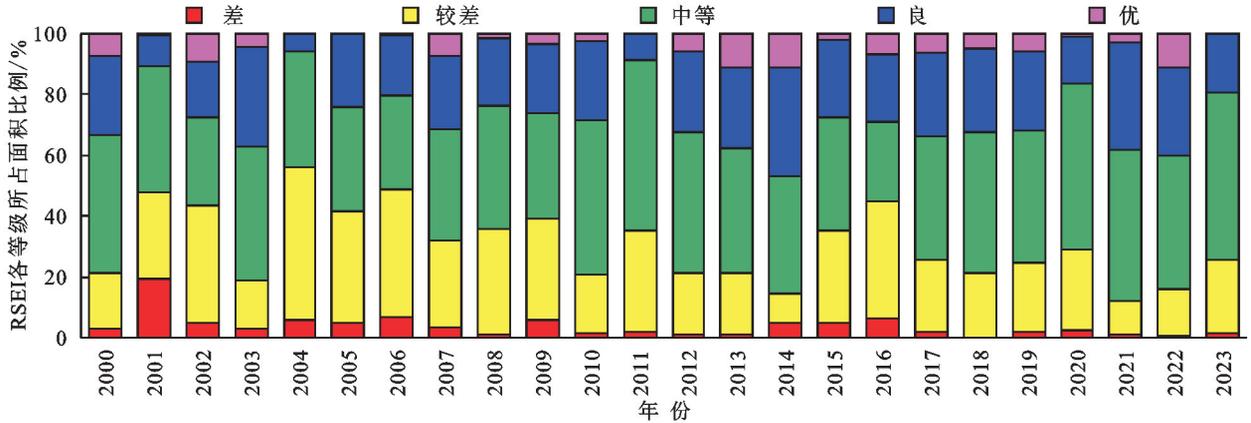


图 5 关中平原城市群生态环境质量各等级所占面积比例

Fig. 5 The proportion of areas occupied by different ecological and environmental quality grades in the Guanzhong Plain Urban Agglomeration

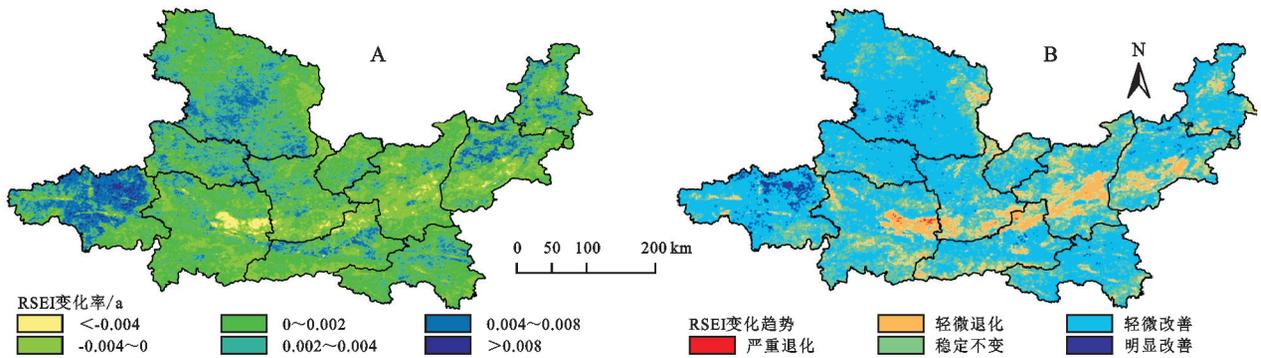


图 6 2000—2023 年关中平原城市群生态环境质量变化率及变化趋势空间分布
Fig. 6 Spatial distribution of ecological and environmental quality change rates and trends in the Guanzhong Plain Urban Agglomeration from 2000 to 2023

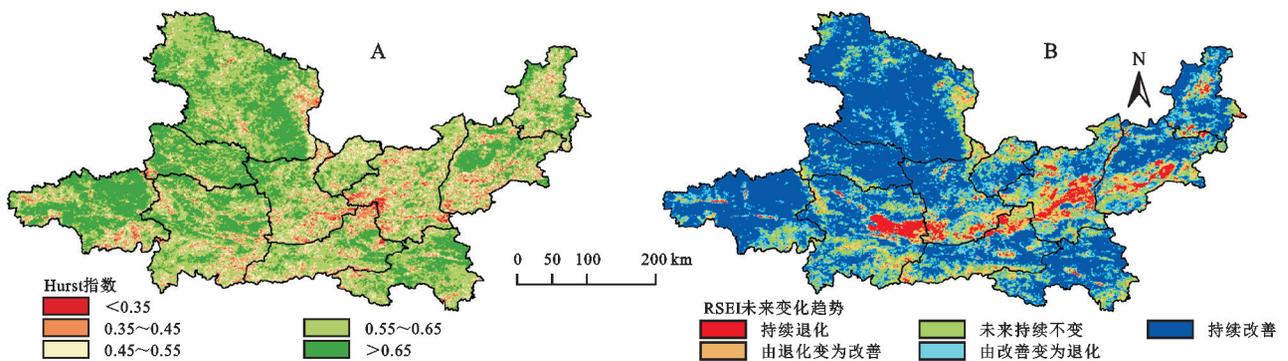


图 7 2000—2023 年关中平原城市群 RSEI-Hurst 指数及未来持续性空间分布
Fig. 7 Spatial distribution of the RSEI-Hurst Index and future persistence in the Guanzhong Plain Urban Agglomeration from 2000 to 2023

2.3 RSEI 变化驱动因素分析

以 2005 年、2010 年、2015 年、2020 年作为时间节点,分析 2000—2023 年 RSEI 变化的驱动因素。因变量 Y 为 RSEI,自变量 X 分为自然因子和人为因子,自然因子包括高程(EL)、坡度(SL)、降水(PRE)、

气温(TMP),人为因子包括国内生产总值(GDP)、土地利用(LU)、夜间灯光(NTL)、人口密度(PD)。采用自然间断点分级法将除土地利用数据外的栅格数据重分类为 5 类,土地利用数据根据所属大类分为 5 类(林地、草地、耕地、城市和建成用地、裸地)。通

过地理探测器得到每个因子对 RSEI 的解释度(表 2)。可以看出,所有探测因子的 p 值均为 0,表明所选的 8 个驱动因子对 RSEI 的空间分异具有显著影响。计算 8 个驱动因子 4 个年份 q 值均值,夜间灯光和坡度分别是人为因子和自然因子中对 RSEI 空间分异影响最大的因子,各影响因子中夜间灯光的解释力最大,是关中平原城市群生态质量变化的主控因子。夜间灯光间接反映了城市的发展规模和人类活

动程度,也会带来诸如能源消耗和碳排放等社会问题,一定程度上对生态环境质量产生影响。坡度越大会加剧土壤的侵蚀和水土流失,同时也会对植被的生长状况和分布格局产生影响,进而影响整个生态环境质量。这表明城市化对生态环境质量产生的重要影响,在城市化进程推进中应关注能源消耗、碳排放等与夜间灯光相关的社会经济问题,从而维护和改善生态环境质量。

表 2 关中平原城市群 RSEI 单因子探测结果

Table 2 RSEI single factor detection results of the Guanzhong Plain Urban Agglomeration

因子	2005 年			2010 年			2015 年			2020 年		
	q 值	p 值	q 值排序	q 值	p 值	q 值排序	q 值	p 值	q 值排序	q 值	p 值	q 值排序
EL	0.039	0	5	0.025	0	5	0.128	0	4	0.333	0	2
GDP	0.005	0	8	0.081	0	3	0.206	0	3	0.099	0	5
LU	0.348	0	2	0.010	0	8	0.013	0	7	0.023	0	7
NTL	0.019	0	6	0.285	0	1	0.462	0	1	0.180	0	3
PD	0.006	0	7	0.026	0	4	0.025	0	6	0.038	0	6
PRE	0.363	0	1	0.011	0	7	0.011	0	8	0.019	0	8
SL	0.152	0	3	0.269	0	2	0.378	0	2	0.130	0	4
TMP	0.052	0	4	0.020	0	6	0.115	0	5	0.355	0	1

进一步对研究区各因子的交互作用进行分析(图 8),双因子组合显著提高了对生态环境质量变异解释力,揭示出生态环境质量的空间分异性主要由各因子之间的相互增强和非线性影响所驱动。具体来看,降水与土地利用、温度与土地利用在多数年份表现出较强的交互作用效应,尤其是降水与土地利用的交互作用在大部分年份成为关键影响因素。降水与土地利用的交互作用之所以显著,可能是因为降水直接影响土壤水分状况,进而影响植被生长。而不同土地利用类型下,植被覆盖度不同,土壤侵蚀程度也有所差异。温度与土地利用的交互作用则可能因为不同土地利用类型下,地表温度差异较大。如城市地区温度较高,植被生长受限;而林地温度较低,植被生长良好。这些差异导致了不同土地利用方式下生态环境质量的差异。单因子探测中, q 值均值较小的降水和土地利用,与其他因子交互作用后,对研究区生态环境质量的解释力显著上升,表明降水量和土地利用与其他因子交互作用后会对关中平原城市群的生态环境质量产生较大影响。

人口密度和国内生产总值交互作用解释力最小,可能是因为两者之间存在较强的独立关系。人口密度主要反映人口分布状况,而 GDP 则代表经济发展水平。在不同地区,人口密度和 GDP 的关系存在差异,这使得它们对生态环境质量的影响具有一定的独立性。

在单因子探测中, q 值均值较大的夜间灯光和坡

度,与其他因子交互后对研究区 RSEI 解释力变弱,可能因为两因子存在独立关系,两者在影响生态环境质量时可能更多地独立发挥作用,而非通过交互作用来共同影响区域生态环境质量的变化。

3 讨论与结论

3.1 讨论

关中平原城市群是黄河流域生态保护与高质量发展的核心区域,也是中国西部地区最大的城市群之一,作为西北经济与文化重心,其生态环境质量影响着区域可持续发展、水资源安全及生物多样性保护等多方面。本文对 2000—2023 年关中平原城市群的生态环境质量进行了动态监测和评估表明,研究区生态环境质量总体在转好—变差之间波动,生态环境质量状况在向好发展,但等级为优的生态环境质量面积占比较少,且近 5 年呈减少趋势。这表明随着城市化进程的加快,关中平原城市群仍面临着严峻的生态环境问题,如大气污染、水资源短缺、土地退化等。因此,对关中平原城市群进行生态环境质量监测具有重要的意义,既可以揭示生态环境质量演变的特征和过程,又可以为生态环境治理和可持续发展提供科学依据。

本文基于 GEE 平台,结合空间分析和统计方法,对 2000—2023 年关中平原城市群的生态环境质量空间演变进行监测,较好地反映了生态环境质量时空变化格局,实现了大范围、多时相、高频率的生态环境监

测,对中尺度研究区生态环境质量演变遥感监测具有良好的计算展示效果。采用 Sen+MK 趋势分析法,对研究区生态环境质量的时空变化特征进行分析,结合 Hurst 指数对其未来发展趋势进行空间展示,研究结果揭示了关中平原城市群未来生态环境质量的区域差异性演变趋势。研究结果显示,2000—2023

年关中平原城市群生态环境质量整体呈上升趋势,这与罗逸臻等^[27]研究结果一致;在城市化进程的影响下,城市区域的生态环境质量较差,这一发现与郑子豪等^[10]的研究结果相符;降水、气温和土地利用变化对生态环境质量产生了显著影响,这与吴小波等^[11]研究结果相吻合。

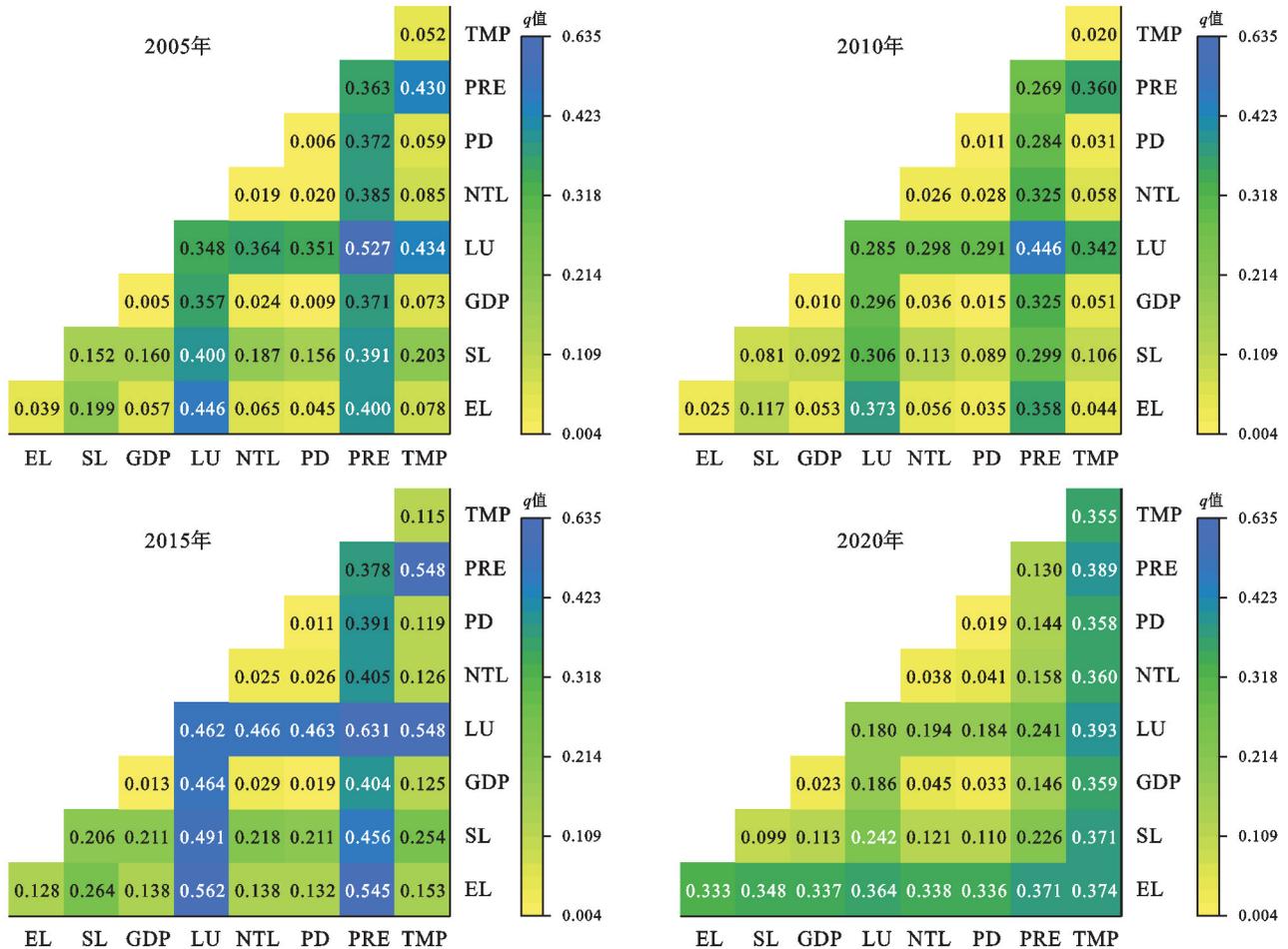


图 8 2000—2020 年关中平原城市群影响因子交互探测

Fig. 8 Interactive detection of influencing factors of the Guanzhong Plain Urban Agglomeration from 2000 to 2023

本文的研究结论为精细化制定区域生态环境保护措施提供了科学依据。对于关中平原城市群生态环境质量的时空差异性演变及未来趋势,针对不同区域应采取差异化的环境保护措施。城市化进程加速的中心区域,如西安、咸阳等地,未来将持续面临生态环境退化问题;而部分正在经历城镇化协调发展的城市 and 地区,可能出现生态环境改善—退化的逆转现象。大部分农业生态用地由于受城市化进程影响较小,生态环境有望持续改善。中南部地区的农林地恢复与治理措施已见成效,对生态环境产生积极正面影响。以主要林区为代表的山区地带,生态环境质量趋于稳定,显示出生态保护政策的有效性和长期稳定性。在城市规划中应加强对中心区域城市化进程的生态影响评估,实施绿色基础设施建设,

以减缓生态环境退化;对正处于城镇化协调发展阶段的区域,制定科学的生态保护和环境管理政策,防止生态环境质量改善后的逆转;对于农业生态用地,继续保护和优化其生态环境;对于生态环境质量稳定的山区地带,持续执行和强化生态保护政策,确保其长期稳定性。

本文将关中平原城市群作为一个整体,分析了近 24 年生态环境质量时空演变特征,但各城市间生态环境质量空间分布存在差异,这是因为各城市的地理位置、气候条件、人口密度、工业发展因素存在差异,但限于篇幅原因本文未展开探讨。西安作为关中平原城市群的核心城市,属于国家级综合性中心城市,具有强大的经济实力和科技创新能力,起到辐射带动作用;咸阳与西安构成了西安都市圈,承担部

分中心城市的职能,渭南、宝鸡、铜川、杨凌、商洛等城市属于重要节点城市,拥有相对独立的产业体系和较为完善的基础设施,起到连接核心城市与其他城市、促进区域内经济和人口要素流动的重要作用;天水、庆阳、平凉等城市属于区域性中心城市,在各自的区域内具有一定中心地位,对周边地区起到辐射和带动作用;运城、临汾等属于协同发展城市,通过与其他城市协同发展,共同推动城市群的经济增长和社会的发展。后续研究可根据关中平原城市群各城市的特点,深入探讨各城市生态环境质量的时空演变格局,以期城市化进程与生态环境高质量保障的协同发展提供坚实的科学依据。

3.2 结论

(1) 2000—2023年,关中平原城市群生态环境质量整体呈上升趋势,各市的RSEI时空演变存在差异,表明不同城市在生态环境改善方面进展不一,体现了区域生态环境保护的不均衡性。空间分布上,黄土高原沟壑区等植被覆盖低的区域,以及部分处于城市高速扩张阶段的城市群区域生态环境质量等级较差;秦巴山区等林区植被覆盖度高,生物多样性、水源保护、大气环境等方面均对生态环境起正向影响作用,这些区域生态环境质量等级常年在良以上。

(2) 近24年关中平原城市群生态环境质量虽然在向好发展,但生态环境质量等级为优的区域面积占比较少,且近5年呈减少趋势。生态环境质量发生退化的区域集中在中心城市群,随着城市化进程发展,城市扩张、农田减少、森林遭到破坏等,原有生态系统遭到破坏;城市化进程导致的能源消耗增加、水资源短缺和污染、生物多样性丧失等,均对生态系统稳定性产生负面影响。关中平原城市群生态环境质量未来发展趋势中,大城市、中等城市呈持续退化,处于积极推进城市化和城镇化区域协调发展阶段的小城市呈由改善到退化趋势。在关中平原城市群的生态环境保护工作中,应当针对各个区域的特性采取因地制宜、差异化的环境保护策略。

(3) 城市夜间灯光和坡度分别是对关中平原城市群生态环境质量影响最大的人为单因子和自然单因子。夜间灯光揭示了人类活动强度与城市发展规模,并且在一定程度上关联着能源消耗、碳排放等社会问题,是决定区域生态质量变化的关键因素;而坡度则通过影响土壤侵蚀、水土流失及植被分布格局,对生态环境质量产生直接影响。因此,城市化进程与自然地理特征共同形成了关中平原城市群复杂的生态环境现状。降水或气温与土地利用交互作用对研究区生态环境质量影响最显著,尤其是降水与土地利

用的交互作用在大部分年份成为关中平原城市群生态环境质量演变的关键影响因素。

参考文献(References):

- [1] 张国俊,黄婉玲,周春山,等.城市群视角下中国人口分布演变特征[J].地理学报,2018,73(8):1513-1525.
Zhang G J, Huang W L, Zhou C S, et al. Spatio-temporal characteristics of demographic distribution in China from the perspective of urban agglomeration[J]. Acta Geographica Sinica, 2018,73(8):1513-1525.
- [2] 方创琳.中国城市群研究取得的重要进展与未来发展方向[J].地理学报,2014,69(8):1130-1144.
Fang C L. Progress and the future direction of research into urban agglomeration in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2014,69(8):1130-1144.
- [3] 顾朝林.城市群研究进展与展望[J].地理研究,2011,30(5):771-784.
Gu C L. Study on urban agglomeration: progress and prospects[J]. Geographical Research, 2011,30(5):771-784.
- [4] 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.
- [5] von Glasow R, Jickells T D, Baklanov A, et al. Megacities and large urban agglomerations in the coastal zone: interactions between atmosphere, land, and marine ecosystems[J]. Ambio, 2013,42(1):13-28.
- [6] 杨朔,郑晓箐,赵国平.关中平原城市群“三生”空间生态环境效应及影响因素研究[J].干旱区资源与环境,2023,37(9):26-35.
Yang S, Zheng X Z, Zhao G P. Spatial ecological effects of ecological-production-living spaces in the Guanzhong Plain Urban Agglomeration and influencing factors[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2023,37(9):26-35.
- [7] Airiken M, Zhang F, Chan N W, et al. Assessment of spatial and temporal ecological environment quality under land use change of urban agglomeration in the North Slope of Tianshan, China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022,29(8):12282-12299.
- [8] Khan M Q S, Yan Q Y, Alvarado R, et al. A novel EKC perspective: do agricultural production, energy transition, and urban agglomeration achieve ecological sustainability? [J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2023,30(16):48471-48483.
- [9] 陈靖松,张建军,李金龙,等.京津冀地区碳排放时空格局变

- 化及其驱动因子[J].生态学报,2024,44(6):2270-2283.
- Chen J S, Zhang J J, Li J L, et al. Spatio-temporal pattern of carbon emissions and its driving factors in the Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024,44(6):2270-2283.
- [10] 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.
- [11] 吴小波,范晓雨,刘晓敬,等.基于 Google Earth Engine 云平台的成渝城市群生态环境质量时空变化[J].生态学杂志,2023,42(3):759-768.
- Wu X B, Fan X Y, Liu X J, et al. Temporal and spatial variations of ecological quality of Chengdu-Chongqing Urban Agglomeration based on Google Earth Engine cloud platform[J]. Chinese Journal of Ecology, 2023, 42(3):759-768.
- [12] 郭城,陈颖彪,郑子豪,等.顾及时空背景的遥感生态指数适用性分析:以粤港澳大湾区为例[J].地理与地理信息科学,2021,37(5):23-30.
- Guo C, Chen Y B, Zheng Z H, et al. Applicability analysis of RSEI considering spatio-temporal background: a case study of Guangdong-Hong Kong-Macao greater bay area[J]. Geography and Geo-Information Science, 2021,37(5):23-30.
- [13] 景永才,陈利顶,孙然好.基于生态系统服务供需的城市群生态安全格局构建框架[J].生态学报,2018,38(12):4121-4131.
- Jing Y C, Chen L D, Sun R H. A theoretical research framework for ecological security pattern construction based on ecosystem services supply and demand[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018,38(12):4121-4131.
- [14] 李海东,马伟波,张龙江,等.美丽城市生态环境协同治理:基于生态韧性与协同增效的考察[J].生态与农村环境学报,2023,39(8):1096-1102.
- Li H D, Ma W B, Zhang L J, et al. Synergistic governance of urban ecology and environment: from the perspectives of ecological resilience and synergistic efficiency[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2023,39(8):1096-1102.
- [15] 达成,张富涛,钱勇生,等.关中平原城市群“交通-产业-环境”耦合协调发展的动态演化特征分析[J].干旱区地理,2022,45(3):955-965.
- Da C, Zhang F T, Qian Y S, et al. Dynamic evolution characteristics of coordinated development of transportation-industry-environment in Guanzhong Plain urban agglomeration[J]. Arid Land Geography, 2022,45(3):955-965.
- [16] 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.
- [17] Pech-May F, Aquino-Santos R, Rios-Toledo G, et al. Mapping of land cover with optical images, supervised algorithms, and google earth engine [J]. Sensors, 2022,22(13):4729.
- [18] Khan R, Gilani H. Global drought monitoring with big geospatial datasets using Google Earth Engine [J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2021,28(14):17244-17264.
- [19] 薛桦,刘萍.基于 RSEI 的黄河中游地区生态环境质量时空演化特征及驱动因素:以延安市为例[J].水土保持研究,2024,31(1):373-384.
- Xue H, Liu P. Spatiotemporal variation of ecological environmental quality and its response to different driving factors in the section of Yellow River Basin in recent 31 years: taking Yan'an city as an example[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024,31(1):373-384.
- [20] 钟欣呈,许泉立.基于 RSEI 模型的玉溪市生态环境变化监测与评价[J].水土保持研究,2021,28(4):350-357.
- Zhong X C, Xu Q L. Monitoring and evaluation of ecological environment changes in Yuxi city based on RSEI model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021,28(4):350-357.
- [21] 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.
- [22] 徐涵秋,邓文慧. MRSEI 指数的合理性分析及其与 RSEI 指数的区别[J].遥感技术与应用,2022,37(1):1-7.
- Xu H Q, Deng W H. Rationality analysis of MRSEI and its difference with RSEI[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2022,37(1):1-7.
- [23] 毛智慧,黎丽莉,程露,等.广东省植被叶面积指数时空变化特征及其影响因素[J].地球科学与环境学报,2023,45(4):907-919.
- Mao Z H, Li L L, Cheng L, et al. Spatio-temporal variation of vegetation leaf area index and its influencing factors in Guangdong Province, China[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2023,45(4):907-919.

- 2176-2188.
- [23] 中国共产党第二十次全国代表大会.高举中国特色社会主义伟大旗帜,为全面建设社会主义现代化国家而团结奋斗[R].北京,新华社,2020.
The 20th National Congress of the Communist Party of China. Hold high the great banner of socialism with Chinese characteristics, and unite together to build a modern socialist country in an all-round way [R]. Beijing, Xinhua, 2020.
- [23] 中国共产党第二十次全国代表大会.高举中国特色社会主义伟大旗帜,为全面建设社会主义现代化国家而团结奋斗[R/OL].北京,新华社,2020,10-25.https://www.gov.cn/gongbao/content/2022/content_5722378.htm
The 20 th National Congress of the Communist Party of China. Hold high the great banner of socialism with Chinese characteristics, and unite together to build a modern socialist country in an all-round way[R/OL]. Beijing, Xinhua, 2020, 10-25. https://www.gov.cn/gongbao/content/2022/content_5722378.htm
- [24] 王巍,路春艳,王英哲.黑龙江省资源型城市人口流失问题与对策[J].中国人口·资源与环境,2018,28(S2):63-66.
Wang W, Lu C Y, Wang Y Z. Problems countermeasures of population loss in resource-based cities in Heilongjiang [J]. China Population, Resources and Environment, 2018, 28(S2):63-66.
- [25] 禹文豪,艾廷华,刘鹏程,等.设施 POI 分布热点分析的网络核密度估计方法[J].测绘学报,2015,44(12):1378-1383,1400.
Yu W H, Ai T H, Liu P C, et al. Network kernel density estimation for the analysis of facility POI hotspots[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2015, 44(12):1378-1383,1400.
- [26] 赵冬玲,何珊珊,林尚纬,等.基于 TOPSIS 和热点分析的高标准农田建设优先区选择[J].农业机械学报,2017,48(7):153-158.
Zhao D L, He S S, Lin S W, et al. Selection of high-standard farmland construction priority area based on TOPSIS and hotspot analysis[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7):153-158.
- [27] 伊春市人民政府.伊春市推进黑土耕地保护三年行动计划 2020 年度工作实施方案[EB/OL].2020-6-16, <https://www.yc.gov.cn/yysrmzf/c102111/202012/108370.shtml>.
Yichun Municipal People's Government. Yichun City to promote the black soil farmland protection three-year action plan 2020 work implementation plan [EB/OL]. 2020-6-16, <https://www.yc.gov.cn/yysrmzf/c102111/202012/108370.shtml>.
- [28] 佳木斯人民政府.东风区委书记讲党课贯彻落实省党代会精神[EB/OL].2017-5-19, <https://www.jms.gov.cn/html/index/column/content/2017/05/11495181977832.html>.
The Jiamusi People's Government. Dongfeng District Party Committee secretary speaks party lessons to implement the spirit of the provincial Party Congress [EB/OL]. 2017-5-19, <https://www.jms.gov.cn/html/index/column/content/2017/05/11495181977832.html>.
-
- (上接第 346 页)
- [24] 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.
- [25] 王一,郝利娜,许强,等.2001—2019 年黄土高原植被覆盖度时空演化特征及地理因子解析[J].生态学报,2023,43(6):2397-2407.
Wang Y, Hao L N, Xu Q, et al. Spatio-temporal variations of vegetation coverage and its geographical factors analysis on the Loess Plateau from 2001 to 2019 [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(6):2397-2407.
- [26] 金贵,郭柏枢,成金华,等.基于资源效率的国土空间布局及支撑体系框架[J].地理学报,2022,77(3):534-546.
Jin G, Guo B S, Cheng J H, et al. Layout optimization and support system of territorial space: an analysis framework based on resource efficiency[J]. Acta Geographica Sinica, 2022, 77(3):534-546.
- [27] 罗逸臻,黄远程,王涛.关中平原城市群生态环境质量时空变化特征及其驱动力[J].地球科学与环境学报,2023,45(6):1316-1329.
Luo Y Z, Huang Y C, Wang T. Spatial-temporal variation characteristics of ecological environment quality and their driving forces in Guanzhong Plain urban agglomeration, China [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2023, 45(6):1316-1329.