

DOI: 10.5846/stxb202112103510

张静, 杨丽萍, 贡恩军, 王宇, 任杰, 刘曼. 基于谷歌地球引擎和改进型遥感生态指数的西安市生态环境质量动态监测. 生态学报, 2023, 43(5): 2114-2127.

Zhang J, Yang L P, Gong E J, Wang Y, Ren J, Liu M. Dynamic monitoring of eco-environmental quality in Xi'an based on GEE and adjusted RSEI. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(5): 2114-2127.

基于谷歌地球引擎和改进型遥感生态指数的西安市生态环境质量动态监测

张 静¹, 杨丽萍^{1,*}, 贡恩军², 王 宇¹, 任 杰¹, 刘 曼³

1 长安大学地质工程与测绘学院, 西安 710054

2 华北水利水电大学测绘与地理信息学院, 郑州 450046

3 长安大学地球科学与资源学院, 西安 710054

摘要:近年来,在经济全球化的背景下,西安市经济迅速增长,生态环境问题日益突出,快速全面地定量监测生态环境质量的时空变化,对指导生态环境保护具有重要意义。基于谷歌地球引擎(GEE)平台,筛选 2000、2004、2010、2015、2020 年及其前后各一年的四季 Landsat 影像,利用主成分分析基于绿度(NDVI)、热度(LST)、干度(NDSI)、湿度(Wet)和气溶胶光学厚度(AOD)构建改进型遥感生态指数(ARSEI),实现西安市 2000—2020 年生态环境质量的动态监测,并运用莫兰指数(Moran's *I*)探讨西安市生态环境质量的空间自相关。以主成分效果最好的夏季为例,结果表明:(1)构建的 ARSEI 将大气污染因素考虑在内,第 1 主成分(PC1)贡献度在 83%以上,能较好地集中各指标特征,有助于更加全面地评价研究区生态环境质量;(2)西安市 2000—2020 年平均 ARSEI 分别为 0.565、0.521、0.572、0.644、0.695,生态环境质量总体呈现先退化后转好的趋势。20 年来,生态环境质量较差和极差等级的面积减少了 1339.08 km²,主要分布在秦岭以北地区,良好和极好等级区面积增加了 2241.80 km²,主要位于南部的秦岭地区;(3)西安市生态环境质量改善区面积大于退化区,改善和退化情况在各辖区均有发生。2000—2004 年退化情况最为严重,占比 29.41%,而 2010—2015 年改善区占比最大,达 31.62%;(4)5 个年度的全局莫兰指数(Global Moran's *I*)均在 0.627 以上,表明西安市生态环境质量的空间分布具有较强的正相关,呈聚集分布,且以高-高、低-低分布为主。研究基于 GEE 平台实现了西安市生态环境质量的快速监测,可为生态环境监测与治理保护提供方法借鉴与数据支撑。

关键词:生态环境质量;改进型遥感生态指数;莫兰指数;谷歌地球引擎;西安市

Dynamic monitoring of eco-environmental quality in Xi'an based on GEE and adjusted RSEI

ZHANG Jing¹, YANG Liping^{1,*}, GONG Enjun², WANG Yu¹, REN Jie¹, LIU Man³

1 School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China

2 College of Surveying and Geo-Informatics, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China

3 School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, China

Abstract: As the capital city of Shaanxi Province, Xi'an has experienced rapid economic growth and urbanization under the economic globalization background in recent decades and still besets by increasingly prominent ecological problems. Xi'an is also one of the typical cities suffering from severe aerosol pollution in China. Rapidly and comprehensively quantitative monitoring of the spatio-temporal variations of eco-environmental quality in Xi'an is crucial for regional eco-environmental guidance and protection. This study was carried out on Google Earth Engine (GEE), a new cloud-computing platform with

基金项目:国家自然科学基金项目(41371220,42071345);陕西省重点研发项目(2020ZDLSF06-07)

收稿日期:2021-12-10; **网络出版日期:**2022-10-21

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zylpyang@chd.edu.cn

the merits of easy access to tremendous public resources and convenient processing of substantially geospatial data. Four-season Landsat images of 2000, 2004, 2010, 2015, 2020 and those previous-successive target years were selected firstly. Then, principal component analysis (PCA) was used to improve the previously developed remote sensing ecological index (RSEI) by adding aerosol optical depth (AOD) to it, and an adjusted RSEI (ARSEI) including greenness (NDVI), heat (LST), dryness (NDSI), humidity (Wet) and AOD was proposed to dynamically monitor the eco-environmental quality in Xi'an from 2000 to 2020. Moreover, Moran index was adopted to explore the spatial autocorrelation of the eco-environmental quality in Xi'an. Using summer, the season with the best principal component effect, as an example, the results showed that: (1) taking the effect of air pollution into account, the first principal component (PC1) contribution of ARSEI proposed in this paper was more than 83%. ARSEI could better concentrate the characteristics of each index and provide a more comprehensive evaluation for the eco-environmental quality of Xi'an. (2) The average ARSEIs of Xi'an from 2000 to 2020 were 0.565, 0.521, 0.572, 0.644 and 0.695, respectively, indicating that the urban eco-environmental quality degraded from 2000 to 2004 and promoted from 2004 to 2020. In the past 20 years, the areas with poor and very poor eco-environmental quality decreased by 1339.08 km², which were mainly located in the north of Qinling Mountains. The areas with good and excellent eco-environmental quality increased by 2241.80 km² and were concentrated in Qinling areas, southern part of the city. (3) The improved areas were larger than the degraded areas in Xi'an over the past 20 years, and each district has undergone both the improvement and degradation processes. It was worth noting that the city experienced the worst degradation from 2000 to 2004, accounting for 29.41%, and the greatest improvement between 2010 and 2015, accounting for 31.62%. Generally speaking, the eco-environmental quality of Xi'an has been improved in the past 20 years. (4) All the five Global Moran's *I* values were above 0.627 in 2000, 2004, 2010, 2015 and 2020, which indicated that the spatial distribution of the urban eco-environmental quality has a strongly positive correlation. The LISA cluster map showed that the aggregation distribution was dominated by high-high and low-low patterns. The low-low areas were mainly located in the northern Qinling Mountains, while the high-high areas were concentrated in the southern part of the city. Based on GEE cloud platform, this study accomplished fast eco-environmental quality monitoring in Xi'an and will provide method reference and data support for regional eco-environmental monitoring, management and restoration.

Key Words: eco-environmental quality; adjusted remote sensing ecological index; Moran index; Google Earth Engine; Xi'an

生态环境是社会-经济-自然的复合系统,其质量状况可以有效反映区域人类生产活动与环境的协调程度^[1-2]。随着中国经济快速增长、城市化进程加快,部分地区面临着森林退化、土壤侵蚀、水土流失和城市热岛等一系列生态环境问题^[3-6]。开展生态环境质量动态监测和定量评价可为生态环境保护 and 可持续发展提供科学依据。

遥感技术因具有高精度、高效率和大尺度等特点,已被广泛应用于生态环境研究领域^[7]。早期常采用单一的生态因子对生态系统进行评估,然而生态系统是一个复杂的巨系统,受多因素综合影响,仅使用单一指标难以全面反映生态环境的综合特征。因此,在 2006 年国家环境保护部颁发的《生态环境状况评价技术规范》中推出了基于遥感技术的生态环境状况指数(EI),已成为我国县级以上生态环境年度综合评价的基本标准。

然而,上述方法往往需要人为确定因子权重,受主观因素影响大。此外,研究数据多源于社会经济等方面,且一般通过县区年度统计数据获取,致使统计指标受到了时间和地域影响,数据更新通常较慢,不易获得生态环境质量的细部特征。因此,徐涵秋^[8]基于绿度(NDVI)、热度(LST)、干度(NDSI)、湿度(Wet)4个指标,通过主成分分析(PCA)构建了遥感生态指数(RSEI),由于RSEI的4个指标易于获取,且可根据数据特征自动分配权重,结果具有一定客观性,因而得到了广泛应用和不断改进。Nie等^[9]采用地形修正后的RSEI对山西阳泉煤矿1987—2020年的生态环境质量进行了监测和评价,发现修正后RSEI的地形效应大大降低,实用性提高。Xu等^[10]利用RSEI和改进的RSEI评价福建省2002—2017年的生态变化,研究表明改进方法能有效检测全省生态环境的时空变化。然而,传统的生态环境质量评价在长时序分析中面临数据量大、数据处

理困难等问题。谷歌地球引擎(GEE)平台可方便地访问大量公开资源以处理非常大的地理空间数据集^[11],特别适用于大范围、长时序监测,在生态环境质量评价、自然灾害变化检测等领域具有巨大应用潜力^[12-13]。在生态环境评价方面,杨泽康等^[14]基于 GEE 对黄河流域生态环境质量进行了评价,效果良好。

西安市地处中国西北部,是陕西省的政治、经济、文化和旅游中心,随着工业化进程加快,城市生态环境所面临的压力日益严峻。因此,亟需开展生态环境质量时空变化监测研究。气溶胶是固体和液体颗粒混合物,能显著影响生态系统、空气质量、天气和气候,研究气溶胶的时空变化对生态环境安全具有重要意义,而气溶胶光学厚度(AOD)是描述气溶胶含量的重要参数^[15-17]。当前,在生态环境质量监测与评价研究中,缺乏将基于遥感的空气污染物指标与生态环境状况相结合的定量研究。此外,国内外学者对生态环境质量的评价大多集中在数据质量较好的某个季节,但不同地区的生态环境在不同季节往往存在差异性。因此,有必要在这一方向进行深入探讨。

本文基于 GEE 平台将 AOD 数据纳入 RSEI 模型,建立改进型遥感生态指数(ARSEI),利用 PCA 探讨西安市 2000—2020 年生态环境质量的时空变化,并进一步通过莫兰指数(Moran's I)空间自相关分析生态环境质量的特征,以期在城市生态环境质量监测、评价与保护提供理论依据和方法借鉴。

1 研究区概况

西安市地处关中平原中部,是陕西省省会,北临渭河,南依秦岭,包括新城区、碑林区、雁塔区、莲湖区、未央区和长安区等 11 个区以及蓝田和周至两个县,地势东南高,西北与西南低,研究区位置及土地利用类型如图 1 所示。该地区属于暖温带半湿润大陆性季风气候,年平均气温 13.0—13.7℃,年降水量 522.4—719.5 mm。截至 2019 年底,常住人口 1020.35 万人,城镇人口约 761.28 万人,占全市总人口的 74.61%(数据来自西安市统计年鉴 <http://tjj.xa.gov.cn>)。

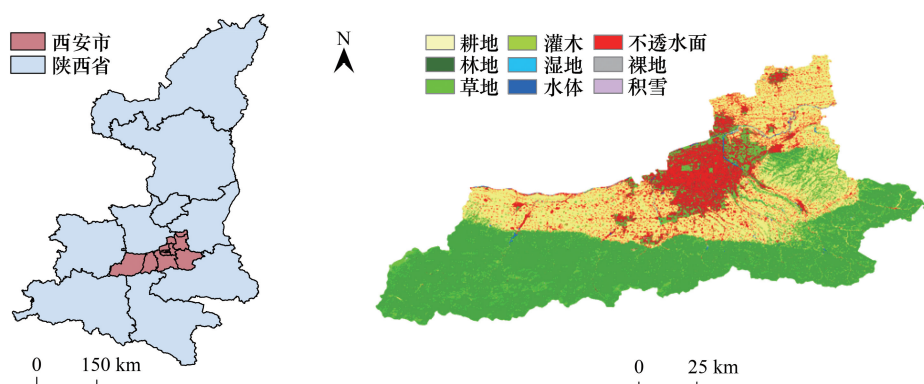


图 1 研究区位置及土地利用图

Fig.1 Study area location and land use map

2 数据与方法

2.1 数据源及预处理

选取西安市 2000、2004、2010、2015、2020 年各目标年份及其前后一年春季(3—5 月)、夏季(6—8 月)、秋季(9—11 月)和冬季(12—2 月)云量小于 10% 的 Landsat 影像,受成像时间限制,2020 年冬季仅选取了 2019 和 2020 年冬季的数据。AOD 数据来自对应目标年份及其前后一年各季 MCD19A2 产品的均值,该产品为 MODIS Terra 和 Aqua 集成产品,每天以 1 km 分辨率生成,数据描述如表 1。

以上数据均源于 GEE 平台数据库。Landsat 5 TM、Landsat 8 OLI/TIRS 地表反射率产品已经过辐射定标、大气校正和几何校正等预处理,通过调用云掩膜算法合成目标年份及其前后一年的均值影像。MODIS 数据

直接在线调用,其分辨率为 1 km,为统一分辨率,将其重采样到 30 m。为避免水域对湿度指标的影响,使用改进的归一化水体指数^[18](MNDWI)去除水体信息。

表 1 数据来源及说明

Table 1 Data sources and description

卫星数据 Satellite data	产品 Products	选用波段 Used bands	空间分辨率 Spatial resolution/m	时间分辨率 Temporal resolution/d
Landsat 5 TM	Surface Reflectance Products	2,3,4,5,6,7	30/120	16
Landsat 8 OLI/TIRS	Surface Reflectance Products	1,2,3,4,5,6,7,10	30/100	16
Terra/Aqua MODIS	MCD19A2	Optical_Depth_047	1000	1

2.2 研究方法

2.2.1 遥感生态指数的计算

在 RSEI 基础上,引入 AOD 数据,利用 PCA 构建 ARSEI,各指标计算方法如表 2。

表 2 指标计算方法

Table 2 Calculation methods of indicators

指标 Indicators	计算方法 Calculation methods	参数含义 Parameters definition
绿度 NDVI ^[19]	$NDVI = (\rho_{NIR} - \rho_{red}) / (\rho_{NIR} + \rho_{red})$	ρ_i 为 Landsat TM/OLI 对应 i 波段的反射率
热度 LST ^[20—21]	$LST_{2015,2019} = \gamma [(\varphi_1 L_{sensor} + \varphi_2) / \varepsilon + \varphi_3] + \delta$ 其中: $\gamma \approx T_{sen}^2 / (b_\gamma L_{sensor})$, $\delta \approx T_{sen} - (T_{sen}^2 / b_\gamma)$ $LST_{2000,2004,2010} = T_{sen} / [1 + (\lambda T_{sen} / \rho) \ln \varepsilon] - 273.15$	b_γ 为常数, T_{sen} 为传感器探测到的亮度温度, L_{sensor} 为传感器测得的辐射亮度, φ_1 — φ_3 的计算可参考文献 ^[20] , ε 为地表比辐射率,通过 NDVI 计算得到 ^[21] , λ 为热红外波段的波长, ρ 为常数
干度 NDSI ^[22]	$NDSI = (IBI + SI) / 2$ $SI = [(\rho_{SWIR1} + \rho_{red}) - (\rho_{NIR} + \rho_{blue})] / [(\rho_{SWIR1} + \rho_{red}) + (\rho_{NIR} + \rho_{blue})]$ $IBI = \frac{2\rho_{SWIR1} / (\rho_{SWIR1} + \rho_{NIR}) - [\rho_{NIR} / (\rho_{NIR} + \rho_{red}) + \rho_{green} / (\rho_{green} + \rho_{SWIR1})]}{2\rho_{SWIR1} / (\rho_{SWIR1} + \rho_{NIR}) + [\rho_{NIR} / (\rho_{NIR} + \rho_{red}) + \rho_{green} / (\rho_{green} + \rho_{SWIR1})]}$	ρ_i 为 Landsat TM/OLI 对应 i 波段的反射率
湿度 Wet ^[23—24]	$Wet_{TM} = 0.0315\rho_{blue} + 0.2021\rho_{green} + 0.3102\rho_{red} + 0.1594\rho_{NIR} - 0.6806\rho_{SWIR1} - 0.6109\rho_{SWIR2}$ $Wet_{OLI} = 0.1511\rho_{blue} + 0.1973\rho_{green} + 0.3283\rho_{red} + 0.3407\rho_{NIR} - 0.7117\rho_{SWIR1} - 0.4559\rho_{SWIR2}$	ρ_i 为 Landsat TM/OLI 对应 i 波段的反射率
气溶胶光学厚度 AOD	来自 MCD19A2 产品 Optical_Depth_047 波段	

NDVI:归一化差值植被指数 Normalized difference vegetation Index;LST:地表温度 Land surface temperature;NDSI:归一化土壤指数 Normalized difference soil index;SI:裸土指数 Soil index;IBI:建筑用地指数 Index-based built-up index;AOD:气溶胶光学厚度 Aerosol optical depth

由于上述五个指标单位不一,在主成分分析前需要进行归一化,公式如下:

$$NI_i = \frac{I_i - I_{\min}}{I_{\max} - I_{\min}}$$

(1)

式中, NI_i 为某指标的归一化值, I_i 是指标值, $I_{\min}$ 和 $I_{\max}$ 分别对应指标最小值和最大值。

基于 GEE 平台利用主成分分析法计算初始 ARSEI₀:

$$ARSEI_0 = 1 - PC1[f(NDVI, LST, NDSI, Wet, AOD)]$$

(2)

式中,PC1 为第一主成分, f 是对各指标进行归一化处理。此外,对 ARSEI₀进行归一化处理得到 ARSEI。参考《生态环境评价技术规范》中基于 RSEI 的生态环境分级标准^[25],将 ARSEI 分为 5 级,即极差(0—0.2)、较差(0.2—0.4)、中等(0.4—0.6)、良好(0.6—0.8)、极好(0.8—1)。

2.2.2 空间自相关分析

空间自相关反映某一区域中的某种现象与邻近区域单元同一现象的相关程度^[26],包括全局空间自相关和局部空间自相关 2 个方面。全局莫兰指数可从整体上揭示生态环境质量空间布局的集聚情况,公式如下:

$$\text{Global Moran's } I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_i - \bar{x}) (x_j - \bar{x})}{\left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} \right) \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3)$$

式中, n 表示样本数量, x_i 与 x_j 表示属性 x 在空间位置 i 和 j 的观测值, $\bar{x}$ 为属性 x_i 的平均值, W_{ij} 为空间权重矩阵,本文采用邻接性的权重矩阵,若第 i 个地区和第 j 个地区相邻,则 W_{ij} 取 1,否则为 0。

为进一步揭示西安市生态环境质量的高-高和低-低空间集聚区,了解生态环境质量局部的空间分布特征,采用局部莫兰指数空间关联局部指标聚类 (LISA) 进行局部空间自相关分析,公式如下:

$$\text{Local Moran's } I = \frac{n(x_i - \bar{x}) \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4)$$

式中,各参数含义同前。

3 结果与分析

3.1 ARSEI 的合理性

由目标年份四季 PCA 结果可知,各年份第一主成分 PC1 的特征值贡献度最高,四季平均值分别为 64.78%、88.48%、67.95% 和 48.11%。受篇幅限制,考虑到夏季 PC1 贡献度较高,因此,以夏季为例展开 PCA 贡献度结果分析。由表 3 可知,NDVI 和 Wet 荷载均为正值,NDSI、LST 和 AOD 荷载均为负值,说明 NDVI 和 Wet 对生态环境质量起促进作用,而 NDSI、LST 和 AOD 对生态环境质量起阻碍作用,与实际相符。表中 PC1 最大达 91.99%,最小为 83.06%,表明 PC1 能较好地集中各指标特征信息,故依据 PC1 构建 ARSEI 评价西安市生态环境质量是合理的。RSEI 是广为使用的生态环境质量评价指数,已被成功应用于城市、矿区和湿地等的生态环境质量评价中^[9,27-28],下文将通过与 RSEI 的对比,进一步检验 ARSEI 的合理性。

表 4 给出了 2000—2020 年 RSEI 与 ARSEI 的指数值、生态等级、差值及其百分比。从指标值变化来看,2000—2004 年 RSEI 与 ARSEI 均有所下降,之后均逐渐上升,反映出西安市生态环境先退化后改善,但总体向好的一致趋势;从指标差值及变化百分比来看,RSEI 和 ARSEI 最大差值为 0.018,变化百分比总体小于 3.249%,两个指标非常接近;从分级结果来看,RSEI 与 ARSEI 的生态级别均为中等和较好,两个指标在数值上虽略有差别,但分级结果完全一致,说明 AOD 对生态环境质量有一定影响,虽然尚未导致生态级别的改变,但在 ARSEI 中已得以体现,进而也说明了 ARSEI 在研究区生态环境监测中的合理性。

3.2 ARSEI 各指标的季节性

图 2 反映了 ARSEI 各指标变化,结果表明 NDVI 和 LST 随季节呈先增后减趋势,而 NDSI 呈先减后增趋势,其中,夏季 LST 最高,NDSI 最低。2010 年以前,Wet 随季节先减后增,之后则呈先增后减趋势。AOD 四季变化趋势不尽相同,2000 年和 2020 年呈先减后增再减的波动趋势,2010 年相反,2004 年表现为先减后增,而 2015 年表现为持续减少。

从 5 个指标年度趋势可见,NDVI 和 Wet 呈波动上升趋势,LST 呈逐年增加趋势,NDSI 存在一定波动。此外,随着经济快速发展,城市化的加快使大气气溶胶颗粒增多,AOD 随年份呈增长态势。

表 3 主成分分析结果
Table 3 The results of principal component analysis

年份 Year	指标 Indicators	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
2000	NDVI	0.6037	0.5549	-0.2281	-0.1458	-0.5041
	Wet	0.4168	-0.7761	-0.1643	0.2632	-0.3570
	LST	-0.4006	0.0321	-0.9100	0.0837	-0.0568
	NDSI	-0.5445	0.0345	0.2984	0.0965	-0.7771
	AOD	-0.0681	-0.2954	-0.0607	-0.9450	-0.1060
	特征值	0.2063	0.0197	0.0156	0.0053	0.0015
	特征值贡献度/%	83.0515	7.9308	6.2802	2.1337	0.6038
2004	NDVI	0.5843	-0.3844	0.3790	-0.2552	-0.5494
	Wet	0.4115	0.7851	-0.0638	0.3358	-0.3117
	LST	-0.3919	0.2654	0.8805	0.0221	-0.0053
	NDSI	-0.5656	-0.0968	-0.2313	0.1620	-0.7686
	AOD	-0.1247	0.3947	-0.1526	-0.8917	-0.1000
	特征值	0.3759	0.0140	0.0124	0.0066	0.0010
	特征值贡献度/%	91.7153	3.4155	3.0251	1.6101	0.2340
2010	NDVI	0.5324	0.1340	-0.6104	-0.0320	0.5699
	Wet	0.4229	-0.5271	0.4946	0.4661	0.2849
	LST	-0.4476	-0.1745	-0.4830	0.7318	-0.0169
	NDSI	-0.5372	0.1906	0.2911	-0.0732	0.7647
	AOD	-0.2203	-0.7983	-0.2540	-0.4906	0.0939
	特征值	0.4191	0.0188	0.0090	0.0078	0.0009
	特征值贡献度/%	91.9887	4.1264	1.9754	1.7120	0.1975
2015	NDVI	0.5741	0.0950	-0.6744	0.1156	-0.4392
	Wet	0.4447	-0.5004	0.6011	0.1411	-0.4127
	LST	-0.2152	-0.1782	-0.1264	0.9438	0.1227
	NDSI	-0.5759	0.2097	0.0555	0.0181	-0.7879
	AOD	-0.3072	-0.8153	-0.4057	-0.2748	-0.0273
	特征值	0.2495	0.0177	0.0062	0.0025	0.0005
	特征值贡献度/%	90.2677	6.4038	2.2431	0.9045	0.1809
2020	NDVI	0.5731	0.0896	-0.6498	0.1341	-0.4722
	Wet	0.4431	-0.4527	0.6343	-0.0619	-0.4386
	LST	-0.2125	-0.2274	0.0289	0.9471	-0.0718
	NDSI	-0.5936	0.2188	0.031	-0.1393	-0.7611
	AOD	-0.2783	-0.829	-0.4164	-0.2482	0.0072
	特征值	0.2065	0.0233	0.0077	0.0039	0.0006
	特征值贡献度/%	85.3306	9.6281	3.1818	1.6116	0.2479

表 4 RSEI 与 ARSEI 的结果对比
Table 4 Comparison between RSEI and ARSEI

指标 Indictors		2000 年	2004	2010 年	2015 年	2020 年
RSEI	数值	0.567	0.514	0.554	0.653	0.713
	等级	中等	中等	中等	较好	较好
ARSEI	数值	0.565	0.521	0.572	0.644	0.695
	等级	中等	中等	中等	较好	较好
差值 Difference		0.002	0.007	0.018	0.009	0.018
差值百分比 Percentage difference/%		0.353	1.362	3.249	1.378	2.525

RSEI:遥感生态指数 Remote sensing ecological index; ARSEI:改进型遥感生态指数 Adjusted remote sensing ecological index

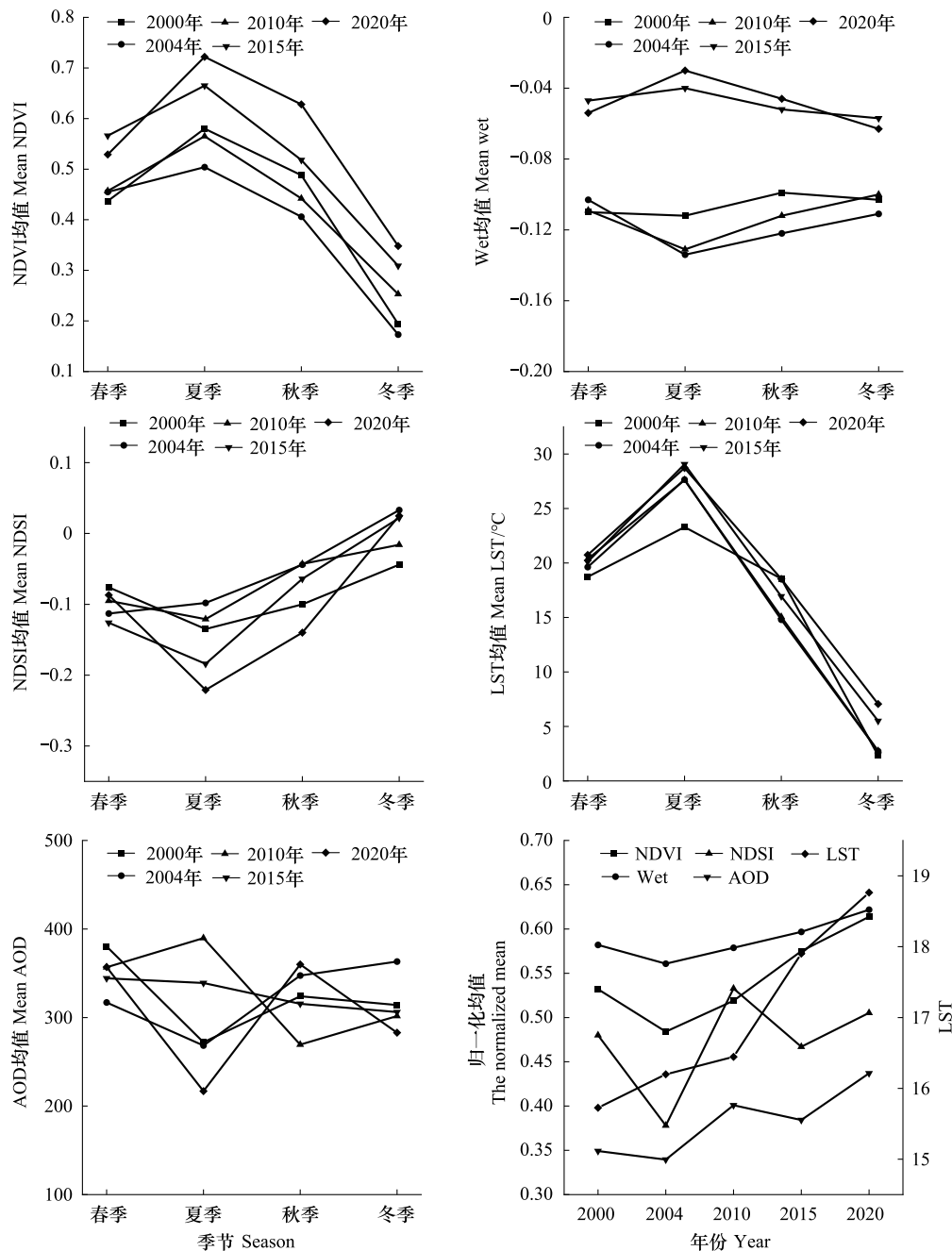


图2 西安市2000—2020年ARSEI各指标趋势图

Fig.2 ARSEI trend maps of each indicator in Xi'an during 2000—2020

NDVI:归一化差值植被指数 Normalized difference vegetation Index;LST:地表温度 Land surface temperature;NDSI:归一化土壤指数 Normalized difference soil index;SI:裸土指数 Soil index;IBI:建筑用地指数 Index-based built-up index;AOD:气溶胶光学厚度 Aerosol optical depth

3.3 西安市生态环境质量时空演变特征

基于各年度四季PC1得到ARSEI四季分布图(图3),左侧代表像元值的数量分布,右侧为相应数据的拟合线。总体而言,ARSEI随季节呈不同变化趋势,夏秋季ARSEI先减后增,春冬季呈先略减后增加再减小趋势,至2015年达最大。下文以夏季为例进行分析。

3.3.1 西安市生态环境质量时空格局

由表4可知,西安市5个年度夏季ARSEI均值分别为0.565、0.521、0.572、0.644和0.695,20年来增长趋势为

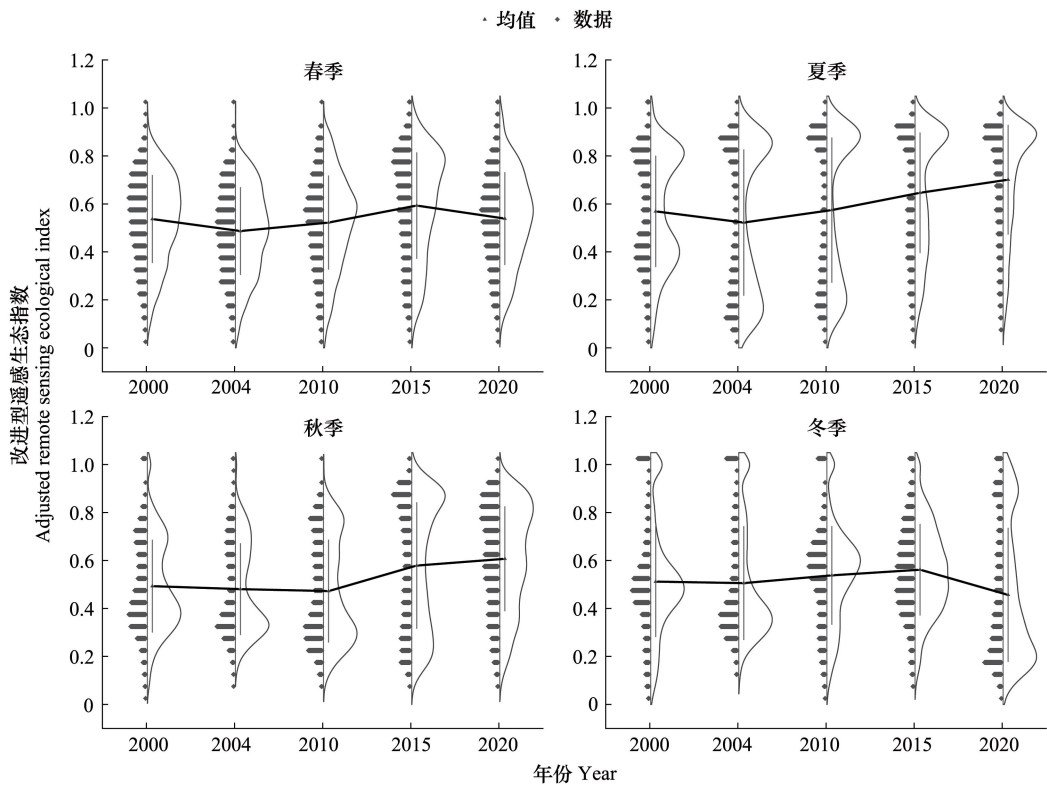


图3 西安市 2000—2020 年 ARSEI 四季分布趋势图

Fig.3 Seasonal ARSEI distribution trend maps in Xi'an from 2000 to 2020
ARSEI:改进型遥感生态指数 Adjusted remote sensing ecological index

0.006/a。表 5 为 2000—2020 年西安市生态环境质量等级面积和比例,图 4 为各年生态环境质量等级分布图。

从时间尺度看(表 5),20 年间生态环境质量较差和极差等级的面积减少了 1339.08 km²,良好和极好等级区面积增加了 2241.80 km²。2000 年西安市生态环境质量主要处于中等水平,到 2004 年,极差等级面积变化最大,增加了 1744.53 km²,占城市总面积的 17.26%。其余三个年度以极好等级为主,占比分别为 40.64%、41.34%和 47.43%。

表 5 西安市 2000—2020 年 ARSEI 等级面积和比例

Table 5 Area and ratio of ARSEI levels in Xi'an during 2000—2020

ARSEI 等级 ARSEI Levels	2000 年		2004 年		2010 年		2015 年		2020 年	
	面积	比例	面积	比例	面积	比例	面积	比例	面积	比例
	Area/km ²	Ratio/%	Area/km ²	Ratio/%	Area/km ²	Ratio/%	Area/km ²	Ratio/%	Area/km ²	Ratio/%
极差 Very poor	527.13	5.23	2271.66	22.50	1624.46	16.10	408.69	4.06	349.73	3.47
较差 Poor	2324.65	23.04	2184.69	21.64	2281.49	22.61	1819.16	18.05	1162.97	11.55
中等 Medium	2499.28	24.78	975.66	9.66	1067.50	10.58	2067.74	20.52	1573.45	15.63
良好 Good	2444.83	24.23	1374.53	13.62	1016.10	10.07	1615.38	16.03	2205.68	21.92
极好 Excellent	2292.29	22.72	3288.88	32.58	4100.86	40.64	4167.53	41.34	4773.24	47.43
总面积 Total area	10088.18	100.00	10095.41	100.00	10090.41	100.00	10078.50	100.00	10065.08	100.00

从空间尺度看(图 4),良好和极好等级区集中分布于西安南部海拔较高的秦岭地区,该地区人口稀少,受人类活动影响较小,土地利用类型以森林为主,起到了良好的生态调节作用。中等等级在各区均有分布,主要集中在秦岭以北。较差和极差等级集中分布在主城区及其外围,如中北部的雁塔区、东北部的阎良区、长安区北部等,这些地区海拔较低,人口分布较为集中,经济活动活跃,对生态环境带来不利影响。

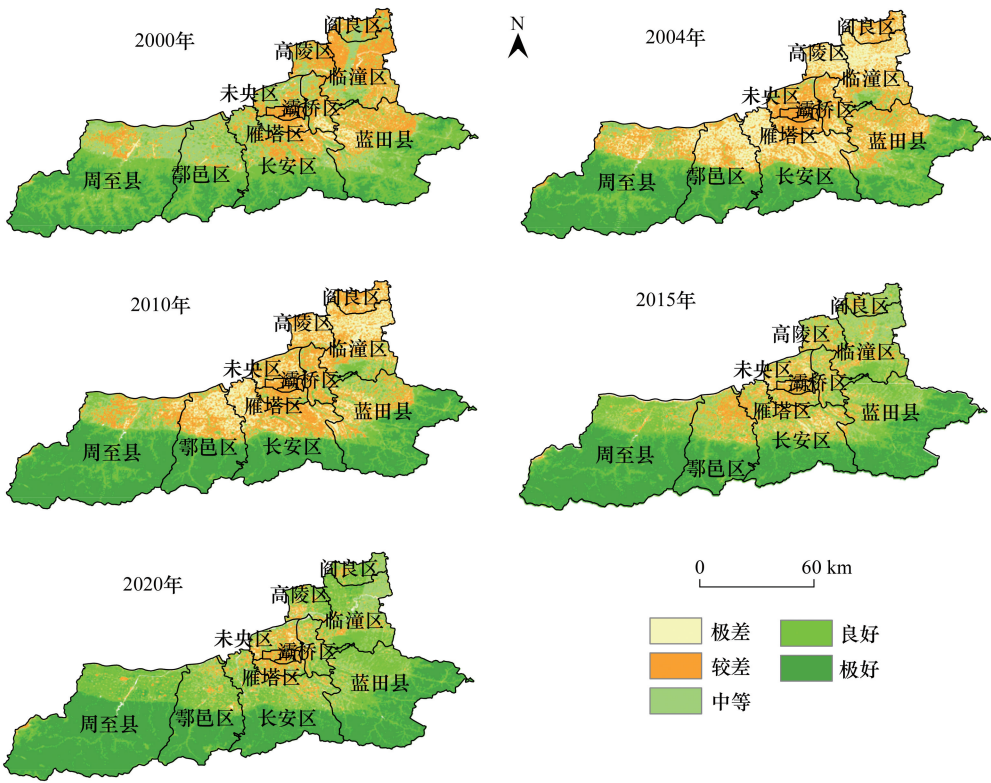


图 4 西安市 2000—2020 年 ARSEI 等级分布图

Fig.4 Distribution maps of ARSEI levels in Xi'an from 2000 to 2020

3.3.2 西安市生态环境质量时空演变趋势

表 6 和图 5 为 2000—2004 年、2004—2010 年、2010—2015 年和 2015—2020 年西安市生态环境质量等级变化统计表及 ARSEI 变化检测差值图像,将变化检测结果分为改善类型(+1、+2、+3、+4)、不变(0)和退化类型(-1、-2、-3、-4)。

表 6 西安市 2000—2020 年 ARSEI 等级变化统计表

Table 6 Variation statistics of ARSEI levels in Xi'an from 2000 to 2020

时段 Year	面积 Area/km ²	退化 Degradation				不变 No change		改善 Improvement		
		-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
2000—2004 年	类面积/km ²	0	119.67	901.11	2091.05	5777.45	1678.66	12.63	0.25	0
	级面积/km ²		3111.84			5777.45		1691.54		
	比例/%		29.41			54.60		15.99		
2004—2010 年	类面积/km ²	0	1.26	26.06	451.03	7181.67	2774.53	144.14	6.67	0
	级面积/km ²		478.35			7181.67		2925.34		
	比例/%		4.52			67.85		27.63		
2010—2015 年	类面积/km ²	0	2.08	25.41	535.88	6666.22	2379.39	869.49	94.90	0
	级面积/km ²		563.38			6666.22		3343.78		
	比例/%		5.33			63.05		31.62		
2015—2020 年	类面积/km ²	0.02	4.53	44.60	567.51	7252.38	2101.75	500.01	82.80	4.93
	级面积/km ²		616.66			7252.38		2689.49		
	比例/%		5.84			68.69		25.47		

从时间尺度看(表 6),4 个时段生态环境质量改善比例平均为 25.18%,退化比例平均为 11.28%。2000—2004 年退化比例(29.41%)大于改善比例(15.99%),说明该时期生态环境质量变差。其余三期改善区均大于退化区,特别是 2010—2015 年,改善区占比最大(31.62%),表明这三个时期生态环境质量处于改善之中。

从空间尺度看(图 5),2000—2004 年生态环境质量退化区主要分布在秦岭以北,如东北部的阎良、高陵和中北部的未央区等,而周至县南部及东南的蓝田县等改善面积较集中。其余三个时间段生态环境质量提升区包括北部大部分地区,区域相对聚集且面积大,退化区包括周至县西南部、长安区中部及主城区外围部分地区,区域面积相对较小。

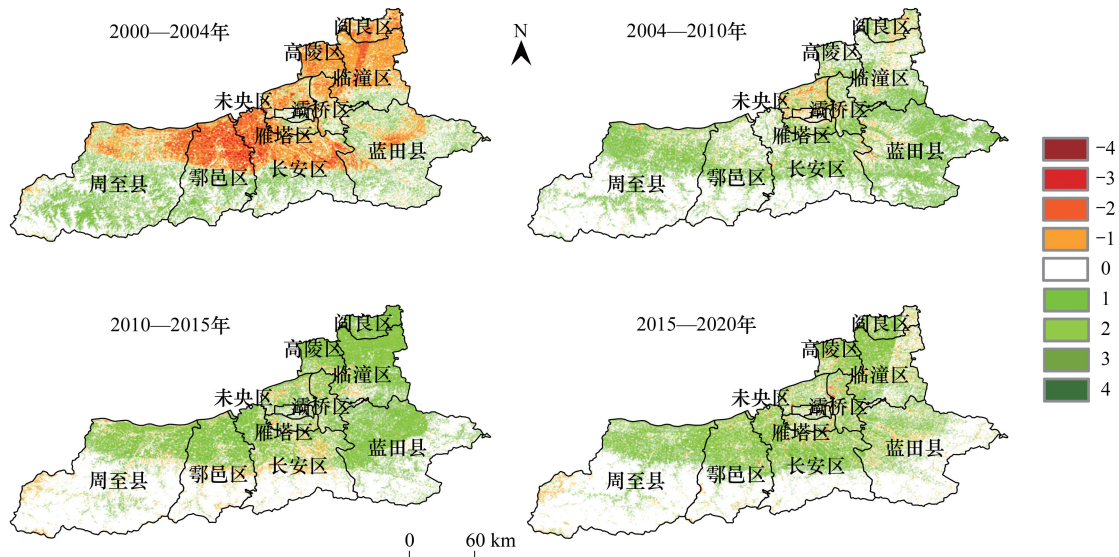


图 5 西安市 2000—2020 年 ARSEI 时空变化图

Fig.5 Spatio-temporal variation maps of ARSEI in Xi'an from 2000 to 2020

3.4 生态环境质量的空间自相关

采用 2 km×2 km 网格进行采样,每幅图像共收集 2252 个样本点。图 6 为 ARSEI 与正指标(NDVI、Wet)和负指标(LST、NDSI、AOD)的四维散点图。考虑 AOD 为新增指标,特用灰度标尺表示它与其他指标的关系。从图 6 可知,ARSEI 越大,NDVI 和 Wet 也越大,AOD 越小;ARSEI 越大,NDSI 和 LST 越小,对应 AOD 也越小。

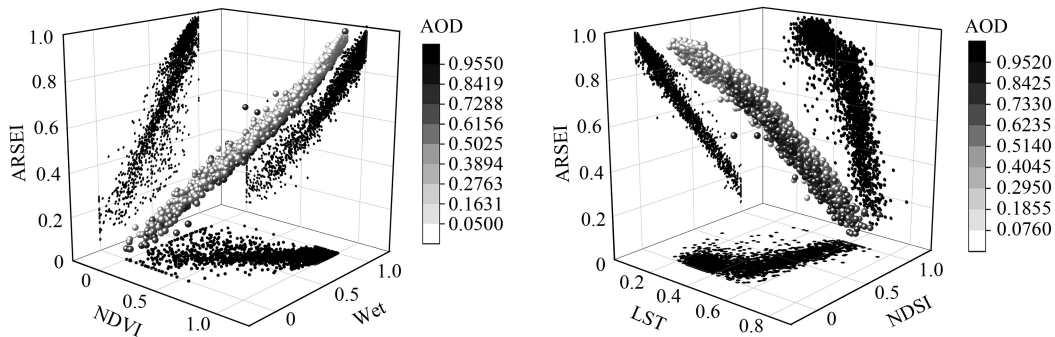


图 6 ARSEI 与各指标四维散点图

Fig.6 4D scatterplots of each index and ARSEI

图 7 为由全局 Moran 指数计算得到的 5 年 Moran 指数散点图。由图可见,各点主要分布在第一三象限,说明生态环境质量空间分布具有较强正相关性,呈聚集性而非随机性。2000—2020 年 Moran 指数先升后降,2010 年空间正相关性最强,可达 0.859,2020 年最弱,值为 0.627。

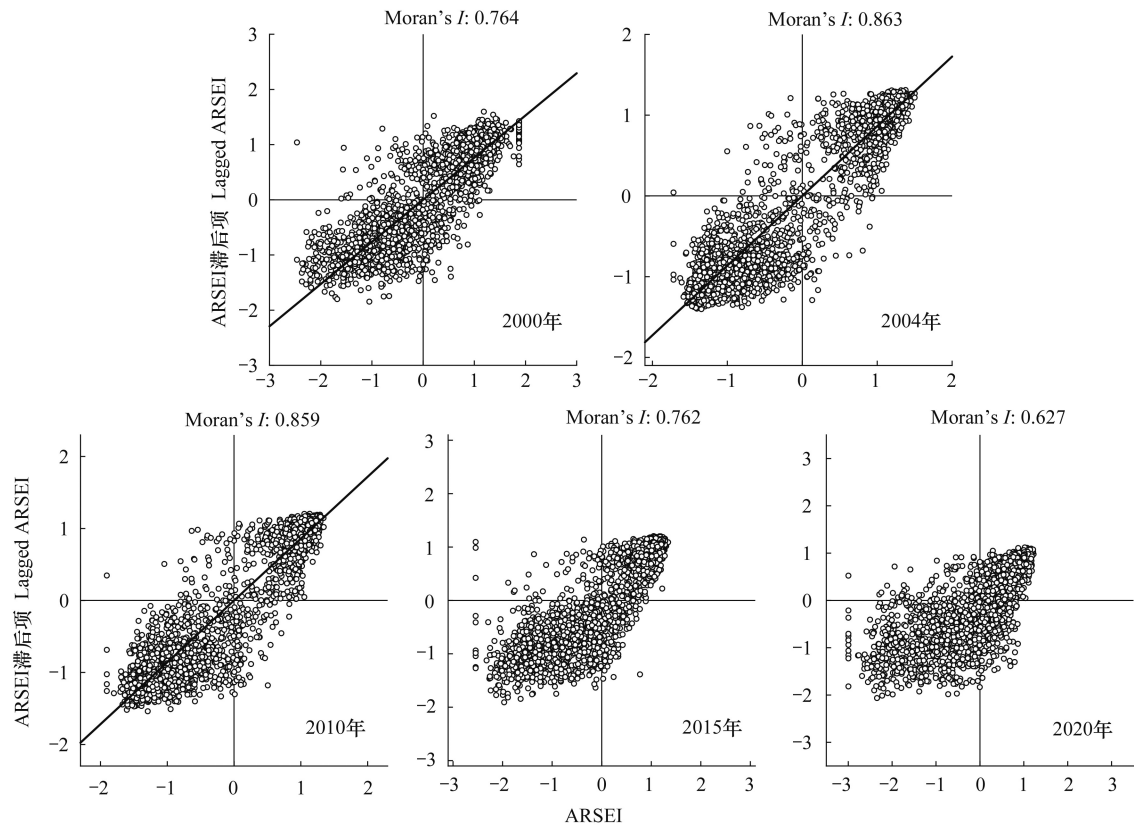


图7 西安市 2000—2020 年莫兰指数散点图

Fig.7 Scatterplots of Moran's *I* in Xi'an from 2000 to 2020

利用局部空间自相关分析,得到 ARSEI 的 5 种聚散类型,即不显著、高-高(HH)、低-低(LL)、高-低(HL)和低-高(LH)。由图 8 知,西安市生态环境质量空间自相关特征以高 ARSEI 值和低 ARSEI 值集聚为主,说明 ARSEI 的空间分布相互联系紧密。其中,不显著型主要分布在蓝田县、鄂邑区中北部等地,南部的秦岭地区形成了 HH 聚集区,有较强的正相关关系。LL 主要位于秦岭北部,如以莲湖区和雁塔区等为中心的主城区及周围。总体上,5 个时期 HL 和 LH 分布分散且面积较小,HH 和 LL 分布集中且所占面积大。

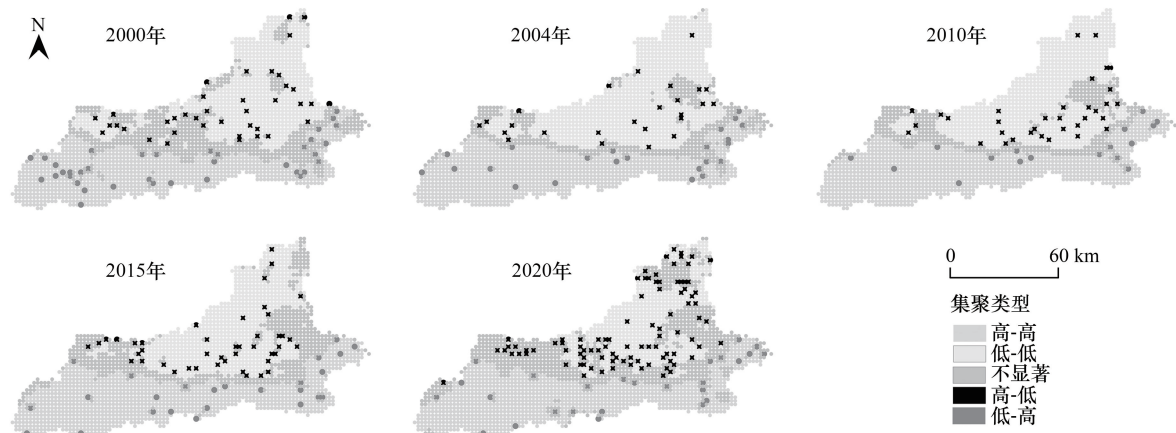


图8 西安市 2000—2020 年空间关联局部指标聚类(LISA)聚类图

Fig.8 LISA cluster maps in Xi'an from 2000 to 2020

4 讨论

气溶胶与人类健康息息相关,与生态安全关系密切。本文在 RSEI 基础上,引入 AOD 指标,构建了 ARSEI,基于 GEE 开展了西安市生态环境质量的动态监测,并利用 Moran 指数实现生态环境质量的空间自相关分析。前人研究表明 GEE 平台可在线调用大尺度、长时序海量数据,方便快捷^[12,14],本研究进一步证实了相比传统处理方法,GEE 平台所具有的独特优势。

RSEI 突破了 EI 权重因子易受主观影响及数据来源的局限,以绿、热、干、湿四个指标为基础,自动分配因子权重,在城市生态环境评价中具有一定普适性^[27]。然而,在中国北方地区城市化快速发展过程中,大气污染对生态环境质量的负面影响不容忽视。万虹麟等^[29]在 RSEI 基础上,引入反映颗粒物 PM2.5 浓度的差值指数,监测了河北沧州市的生态环境质量,进一步凸显了生态环境质量监测中考虑大气污染因素的重要性和迫切性,然而相关工作在西北地区,特别是气溶胶污染典型而严重的西安市尚未见报道。AOD 是气溶胶粒子重要的光学参数之一,可有效反映大气污染程度,故纳入 AOD 指标构建了表征西安市生态环境质量的 ARSEI。从上文的表 3 和表 4 可见,ARSEI 的 PC1 贡献度在 83% 以上,说明其 PC1 能较好地集中各指标信息,ARSEI 和 RSEI 的最大差值为 0.018,差异百分比在 3.249% 之内,同时二者分级结果一致,表明构建的 ARSEI 与具有普适性的 RSEI 具有极大的相似性。对比研究区已有的相关成果,王新杰和薛东前^[30]利用压力-状态-响应(PSR)概念模型计算了西安市 1996—2006 年生态环境综合指数,发现 2000—2004 年生态环境质量变差,与本文同期结果相吻合。赵安周等^[31]采用灰色关联度模型对西安市生态环境质量的评价表明,西安市生态环境综合水平在 2004 年达到较低点,此后呈上升趋势,与本文结果一致。综上所述,ARSEI 能较好地将空气污染因素考虑在内,能包含更多的信息,在西安市生态环境质量评价中具有一定的合理性和全面性。

西安是中国西部地区的中心城市,国家重要的科研、教育和工业基地,近 20 年来发展迅猛。由图 8 可见,2000—2004 年 LL 呈上升趋势,表明生态环境质量下降。2004 年以来,LL 明显下降,HH 变化不明显,表明生态环境质量有所好转。HH 和 LL 分布集中且所占面积大,主要是因为秦岭地区以林地为主,分布广,面积大,区域生态质量整体良好,而秦岭北部地区是西安市人类与经济活动的主要区域,相对而言生态环境质量较差。从前文可知,主城区及周围环境质量下降,究其因可能是由于 2000 年以来西部大开发战略的启动,加之西咸一体化战略的实施,西安市建立多个开发区,城市化进程加快,大片耕地被城市用地取代所致^[32—33]。2004—2010 年生态环境质量有所好转,主要原因是西安世园会的筹办及 2009 年国务院发布的《关中—天水经济区发展规划》,促进了城乡建设和生态环境治理的协调发展^[34—35]。2010 年以来西安市生态环境质量不断提升,与西安市围绕“八水绕长安”的主题大力开展生态恢复治理工程、城镇化水平增长速度放缓、退耕还林、城市建成区绿化以及秦岭生态保护条例的颁布与实施密切相关^[35—36]。黄河是中华民族的母亲河,黄河流域生态保护和高质量发展的重大国家战略,为黄河流域经济转型提供了具有前瞻性的设计,对黄河流域省市发展提出了新要求。西安作为黄河流域最大的城市,在生态环境监测与治理中应有新的担当和创新的智慧,遥感技术及 GEE 平台的综合利用,为深入开展黄河流域城市生态环境动态监测、实现人与自然和谐共生提供了良好手段。

5 结论

(1) 本文构建的 ARSEI 纳入了大气污染指标,PC1 贡献度在 83% 以上,与 RSEI 差异小,分级结果一致。ARSEI 能较好地集中绿、热、干、湿和 AOD 等指标特征信息,有助于更加全面、客观地评价研究区生态环境质量。

(2) 2000—2020 年夏季 ARSEI 分别为 0.565、0.521、0.572、0.644、0.695,呈先减后增趋势。20 年间西安市生态环境质量较差和极差等级区面积减少了 1339.08 km²,良好和极好等级区面积增加了 2241.80 km²,说明研究区生态环境质量总体变好。其中,北部的主城区及周围区域生态环境质量较差,南部秦岭地区生态环境

质量较好。

(3) 研究区生态环境质量以不变为主, 总体而言, 改善区面积大于退化区。2000—2004 年、2004—2010 年、2010—2015 年和 2015—2020 年 4 个时段生态环境质量改善比例平均为 25.18%, 退化比例平均为 11.28%。2000—2004 年改善区集中在南部地区, 退化区集中于北部地区, 其余 3 个时段以改善为主。

(4) 2000—2020 年间 5 期 Moran 指数分别为 0.764、0.863、0.859、0.762、0.627, 表明生态环境质量的空间分布存在较强正相关和一定的内在联系, 空间分布呈聚集性, 以 HH 和 LL 分布为主, 且较为集中, 而 HL、LH 和不显著分布较少且较为分散。

参考文献 (References):

- [1] Lin X Q, Lu C Y, Song K S, Su Y, Lei Y F, Zhong L X, Gao Y B. Analysis of coupling coordination variance between urbanization quality and eco-environment pressure: a case study of the west Taiwan strait urban agglomeration, China. *Sustainability*, 2020, 12(7): 2643.
- [2] Ji J W, Wang S X, Zhou Y, Liu W L, Wang L T. Spatiotemporal change and landscape pattern variation of eco-environmental quality in Jing-Jin-Ji urban agglomeration from 2001 to 2015. *IEEE Access*, 2020, 8: 125534-125548.
- [3] Wang Z, Lyu L X, Liu W X, Liang H X, Huang J G, Zhang Q B. Topographic patterns of forest decline as detected from tree rings and NDVI. *CATENA*, 2021, 198: 105011.
- [4] Zhao G J, Mu X M, Wen Z M, Wang F, Gao P. Soil erosion, conservation, and eco-environment changes in the loess plateau of China. *Land Degradation & Development*, 2013, 24(5): 499-510.
- [5] Zhang F, Xing Z S, Zhao C Y, Deng J L, Yang B, Tian Q, Rees H W, Badreldin N. Characterizing long-term soil and water erosion and their interactions with various conservation practices in the semi-arid Zulihe Basin, Dingxi, Gansu, China. *Ecological Engineering*, 2017, 106: 458-470.
- [6] 王煜, 唐力, 朱海涛, 麦有全, 何伟彪, 王伟民, 刘凯, 苏红波. 基于多源遥感数据的城市热环境响应与归因分析——以深圳市为例. *生态学报*, 2021, 41(22): 8771-8782.
- [7] Yuan B D, Fu L N, Zou Y A, Zhang S Q, Chen X S, Li F, Deng Z M, Xie Y H. Spatiotemporal change detection of ecological quality and the associated affecting factors in Dongting Lake Basin, based on RSEI. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 302: 126995.
- [8] 徐涵秋. 城市遥感生态指数的创建及其应用. *生态学报*, 2013, 33(24): 7853-7862.
- [9] Nie X R, Hu Z Q, Zhu Q, Ruan M Y. Research on temporal and spatial resolution and the driving forces of ecological environment quality in coal mining areas considering topographic correction. *Remote Sensing*, 2021, 13(14): 2815.
- [10] Xu H Q, Wang Y F, Guan H D, Shi T T, Hu X S. Detecting ecological changes with a remote sensing based ecological index (RSEI) produced time series and change vector analysis. *Remote Sensing*, 2019, 11(20): 2345.
- [11] Gorelick N, Hancher M, Dixon M, Ilyushchenko S, Thau D, Moore R. Google earth engine: planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 202: 18-27.
- [12] Xiong Y, Xu W H, Lu N, Huang S D, Wu C, Wang L G, Dai F, Kou W L. Assessment of spatial-temporal changes of ecological environment quality based on RSEI and GEE: a case study in Erhai Lake Basin, Yunnan Province, China. *Ecological Indicators*, 2021, 125: 107518.
- [13] Wang L, Diao C Y, Xian G, Yin D M, Lu Y, Zou S Y, Erickson T A. A summary of the special issue on remote sensing of land change science with Google earth engine. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 248: 112002.
- [14] 杨泽康, 田佳, 李万源, 苏文瑞, 郭睿妍, 刘文娟. 黄河流域生态环境质量时空格局与演变趋势. *生态学报*, 2021, 41(19): 7627-7636.
- [15] Butt M J, Assiri M E, Ali M A. Assessment of AOD variability over Saudi Arabia using MODIS Deep Blue products. *Environmental Pollution*, 2017, 231: 143-153.
- [16] Wang Y, Yuan Q Q, Shen H F, Zheng L, Zhang L P. Investigating multiple aerosol optical depth products from MODIS and VIIRS over Asia: Evaluation, comparison, and merging. *Atmospheric Environment*, 2020, 230: 117548.
- [17] Li Z Q, Guo J P, Ding A J, Liao H, Liu J J, Sun Y L, Wang T J, Xue H W, Zhang H S, Zhu B. Aerosol and boundary-layer interactions and impact on air quality. *National Science Review*, 2017, 4(6): 810-833.
- [18] Xu H Q. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, 27(14): 3025-3033.
- [19] Jiang L L, Jiapaer G, Bao A M, Guo H, Ndayisaba F. Vegetation dynamics and responses to climate change and human activities in Central Asia. *Science of the Total Environment*, 2017, 599/600: 967-980.
- [20] Jiménez-Muñoz J C, Sobrino J A, Skoković D, Mattar C, Cristóbal J. Land surface temperature retrieval methods from Landsat-8 thermal infrared

- sensor data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2014, 11(10): 1840-1843.
- [21] Sobrino J A, Jiménez-Muñoz J C, Paolini L. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 90(4): 434-440.
- [22] 刘栩位, 周启刚, 周浪, 孟浩斌, 李明慧, 彭春花. 基于 RSEI 的三峡库区重庆段水土保持生态功能区生态环境质量动态监测. *水土保持研究*, 2021, 28(5): 278-286.
- [23] Crist E P. A TM Tasseled Cap equivalent transformation for reflectance factor data. *Remote Sensing of Environment*, 1985, 17(3): 301-306.
- [24] Baig M H A, Zhang L F, Shuai T, Tong Q X. Derivation of a tasseled cap transformation based on Landsat 8 at-satellite reflectance. *Remote Sensing Letters*, 2014, 5(5): 423-431.
- [25] 杨保华, 杨清华, 陈剑虹. 关于《生态环境状况评价技术规范(试行)》中土地退化指数的权重及计算方法的探讨. *生态与农村环境学报*, 2011, 27(3): 103-107.
- [26] 陈培阳, 朱喜钢. 基于不同尺度的中国区域经济差异. *地理学报*, 2012, 67(8): 1085-1097.
- [27] Yue H, Liu Y, Li Y, Lu Y. Eco-environmental quality assessment in China's 35 major cities based on remote sensing ecological index. *IEEE Access*, 2019, 7: 51295-51311.
- [28] 王丽春, 焦黎, 来风兵, 张乃明. 基于遥感生态指数的新疆玛纳斯湖湿地生态变化评价. *生态学报*, 2019, 39(8): 2963-2972.
- [29] 万虹麟, 霍飞, 牛玉芬, 张薇, 张秦瑞. 顾及 PM2.5 浓度遥感生态指数模型的沧州市区生态环境质量动态监测分析. *地球物理学进展*, 2021, 36(3): 953-960.
- [30] 王新杰, 薛东前. 西安市城市化与生态环境协调发展模式演化分析. *自然资源学报*, 2009, 24(8): 1378-1385.
- [31] 赵安周, 李英俊, 卫海燕, 陈晓红. 西安市城市化与城市生态环境耦合协调发展研究. *水土保持研究*, 2012, 19(6): 152-156.
- [32] 吴宏安, 蒋建军, 周杰, 张海龙, 张丽, 艾莉. 西安城市扩张及其驱动力分析. *地理学报*, 2005, 60(1): 143-150.
- [33] 冯晓刚, 李锐. 西安咸阳一体化进程中城市扩张及驱动力研究. *测绘科学*, 2011, 36(1): 102-104, 72.
- [34] 郑群明, 王甫园. 世园会筹备对西安市生态足迹的影响. *经济地理*, 2014, 34(2): 154-160, 186.
- [35] 仇振宇, 朱记伟, 解建仓, 张永进, 马增辉. 西安市土地利用效益与城镇化耦合协调关系. *水土保持研究*, 2020, 27(4): 308-316.
- [36] 贾宝全, 邱尔发, 张红旗. 基于归一化植被指数的西安市域植被变化. *林业科学*, 2012, 48(10): 6-12.