

基于 GEE 和 RSEI 的韶关市生态环境质量长时序变化及评价

黄承信¹ 冯楚君² 梁雪映² 郭颖² 郭治兴² 曹伏龙²

1. 西藏大学工学院, 西藏 拉萨 850000

2. 广东省科学院生态环境与土壤研究所, 广东 广州 510520

摘要: 为了解韶关市 2002—2022 年生态环境质量变化情况的特征, 利用 Google Earth Engine(GEE) 平台获取 MODIS 产品库 2002—2022 年 6—8 月的影像, 综合考虑湿度、绿度、干度和热度等多种生态环境要素, 以每 5 年为时间节点, 对韶关市生态环境质量进行了研究。分析结果表明: 2002—2007 年, 韶关市 RSEI 有较大程度降低, 韶关市的生态环境质量存在较大程度的恶化; 2007—2022 年, 韶关市 RSEI 逐渐提高, 韶关市生态环境质量逐步上升且趋于稳定。选取高程、坡度、降水量和人口密度 4 个指标与 RSEI 作相关性分析, 发现 RSEI 与高程、坡度和降水量呈正相关, 人口密度呈负相关, 且生态环境质量好的区域主要分布在人类扰动性活动较少的林地地带。总体而言, 2002—2022 年, 韶关市的生态环境质量经历了从恶化到改善再到稳定的螺旋上升状态, 生态环境质量得到了改善。研究结果为未来改善韶关市的生态环境质量和低碳可持续发展提供了科学依据。

关键词: 生态环境质量; Google Earth Engine; RSEI; 韶关市; 时空变化

中图分类号: X171.1; X87

DOI: 10.3969/j.issn.2097-065X.2024.05.012

0 引言

生态环境质量与人类的生存以及发展密切相关, 关系到地方经济以及农业生态的可持续发展。随着我国经济增长, 城镇化进程加快, 耕地资源减少带来了许多严峻的环境问题, 进而严重制约地方生态环境和经济的可持续发展^[1]。在促进经济发展的同时, 精准监测和评估生态环境质量及其变化, 实现区域生态环境质量可持续发展的目标, 已成为当下研究的热点^[2]。

单一指标评价法和多指标评价法被广泛应用于城市^[3]、森林^[4]和农业^[5]等区域生态环境质量的监测和定量评价。张方等^[6]选取了 20 多个指标, 对合肥市生态环境质量进行评价。徐涵秋^[7]等人提出遥感生态指数(Remote Sensing Ecological Index, RSEI, 由湿度、绿度、热度和干度 4 个指数组成)之后, 大量学者对此展开研究, 如邢栋^[8]等基于 RSEI 对乌鲁木齐的生态环境质量进行分析; 何天星^[9]等利用 GEE 对长三角地区进行生态环境质量动态评估, 苟晓娟^[10]等通过选取海拔、气温、坡度和降水 4 个因子对重庆市的生态环境质量进行长时序分析。

不过, 对区域尺度的生态环境进行质量评价, 不仅需要进行下载遥感影像、去云和进行图像拼接^[11]

等繁琐的数据预处理, 还需要进行单独的主成分分析工作。而由 Google 公司开发的 GoogleEarth-Engine(GEE) 云平台, 通过自带的 MODIS 影像可以较为简便的处理数据。

本文利用 GEE 平台对 MODIS 产品库 2002 年至 2022 年中 6—8 月的影像进行分析, 综合考虑遥感生态指数中的湿度(Wet), 绿度(NDVI), 干度(NDBSI)和热度(LST)等要素, 以每 5 年为时间节点, 采用主成分分析法(PCA)并且使用 GIS 软件对韶关市的生态环境质量的时空动态变化进行研究; 利用研究区湿度、绿度、干度和热度等数据, 构建遥感生态指数; 同时, 利用高程、坡度、降水量和人口密度等数据, 对城市化进程和韶关市生态环境质量变化之间的关系进行分析, 以确定韶关市生态环境质量主要驱动力因素, 为未来研究提供借鉴和参考依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

韶关市位于广东省北部, 地处北纬 23°53′~25°31′, 东经 112°53′~114°45′之间, 与湖南省和江西省相邻, 周围与广东省的惠州市、河源市和清远市接壤(图 1), 为亚热带季风气候区, 降雨量丰沛, 气候温暖宜人, 地形以山地和丘陵为主。全市总面积为 1.84 万 km², 下辖武江区、浈江区等 10 个区县。

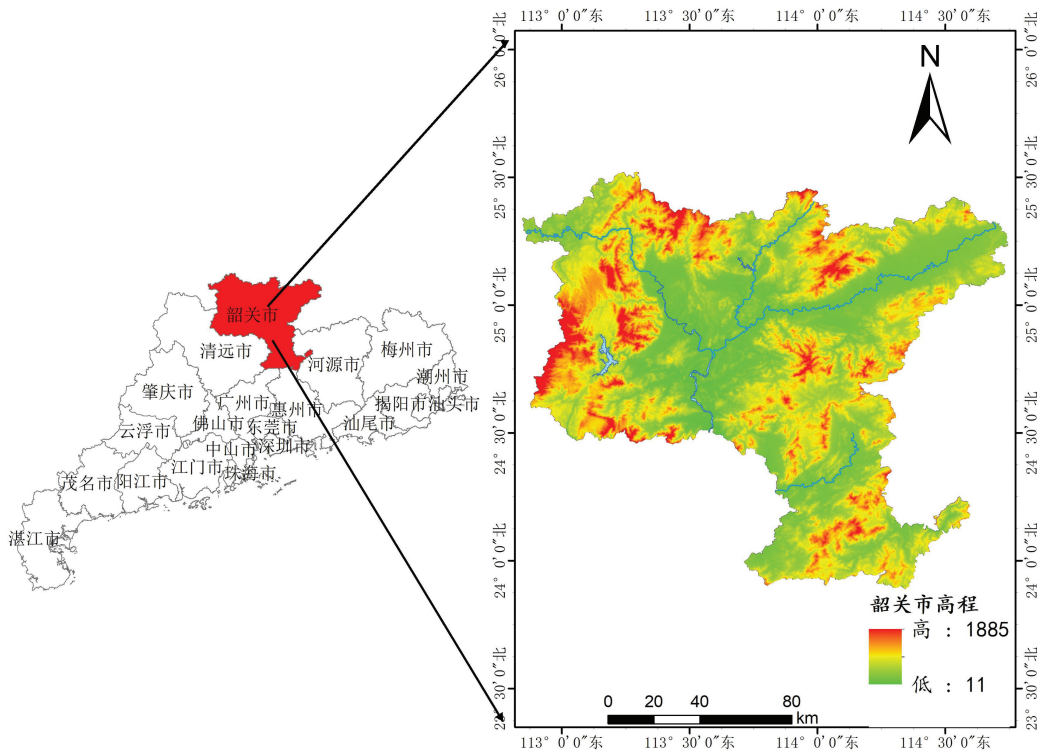


图 1 韶关市地理位置示意图

1.2 数据来源

本次实验的数据主要来源于 Google Earth Engine 云平台在线提供 500 m 空间分辨率的 MODIS 产品数据,在本研究中,选取了 2002 年、2007 年、2012 年、2017 年和 2022 年的 5 期 MODIS 数据。为了避免气候差异对数据处理的影响,选择了 6—8 月这个时间段进行处理。

2 研究方法

2.1 分量指标计算

本次实验首先是分析 2002—2022 年的 5 幅遥感影像 RSEI 分量指标,遥感生态指数的 4 个分量指标如下所示:

(1) 绿度指标 (NDVI): 本项研究选取归一化植被指数 (Normalized Differences Vegetation Index, NDVI) 作为绿度指标。NDVI 是一种常用的遥感指数,通过计算红外波段和可见光波段的反射率差异来反映植被的状况^[12]:

$$NDVI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{red} + \rho_{nir}} \tag{1}$$

式中 ρ_{red} 、 ρ_{nir} 分别为 MODIS 影像所对应的红波段与近红外波段的反射率。

(2) 热度指标 (LST): 热度指标是指通过遥感反演得到的地球表面温度 (Land Surface Temperature, LST), 本文使用 MODIS 产品库中提供的 LST 数据。

(3) 干度指标 (NDBSI): 为了量化韶关市的干度成分, 本文基于裸土指数 (soil index, SI) 和建筑指数 (index-based built-up index, IBI) 构建了干度指标 (normalized difference built-up and soil index, NDBSI)^[7], 公式如下:

$$NDBSI = \frac{BI + IBI}{2} \tag{2}$$

$$IBI = \frac{\frac{2\rho_{swirl}}{\rho_{swirl} + \rho_{nir}} - \left[\frac{\rho_{nir}}{\rho_{nir} + \rho_{red}} + \rho_{green} / (\rho_{green} + \rho_{swirl}) \right]}{\frac{2\rho_{swirl}}{\rho_{swirl} + \rho_{nir}} + \left[\frac{\rho_{nir}}{\rho_{nir} + \rho_{red}} + \rho_{green} / (\rho_{green} + \rho_{swirl}) \right]} \tag{3}$$

$$SI = \frac{(\rho_{swirl} + \rho_{red}) - (\rho_{nir} + \rho_{blue})}{(\rho_{swirl} + \rho_{red}) + (\rho_{nir} + \rho_{blue})} \tag{4}$$

式中 ρ_{blue} 、 ρ_{green} 、 ρ_{swirl} 和 ρ_{red} 分别为遥感影像中不同波段的地表反射率。

(4) 湿度指标 (WET): 湿度指标能够反应地表的水体条件和土壤的湿润状态, 其绿度、亮度和湿度分量和其物理参数密切相关, 经常用于生态环境质量评价中的湿度监测^[13]。本文采用 $k-t$ 变换后的多光谱影像的第三分量来表征 RSEI 的湿度指标^[14]。公式定义为公式 (5):

$$Wet = 0.1244 \rho_{red} + 0.2425 \rho_{nir} + 0.2307 \rho_{blue} + 0.3233 \rho_{green} - 0.3212 \rho_{nir} - 0.6325 \rho_{swirl} - 0.5201 \rho_{swirl2} \tag{5}$$

式中 ρ_{red} 、 ρ_{nir} 、 ρ_{blue} 、 ρ_{green} 、 ρ_{nir} 、 ρ_{swirl} 和 ρ_{swirl2} 分别为 MODIS 影像的 7 个波段的反射率。

2.2 遥感生态指数的构建

遥感生态指数 RSEI 的构建需要通过主成分分析法(PCA)结合湿度、绿度、热度和干度 4 个分量,进行叠加后将第一主成分作为 RSEI 的值。主成分分析法可以通过各个指标对生态环境质量的贡献度来确定权重,不仅可以同时处理 4 个指标的信息,还能够以单一指标形式代表区域生态环境质量。RSEI 值可以表示为:

$$RSEI = f(NDVI, WET, LST, NDBSI) \tag{6}$$

因为各指标数据范围和单位各不相同,所以需要先将 4 个指标的值归一化处理。在[0,1]范围内,RSEI 的数值愈大且愈接近 1,代表该地区的生态环境质量越好。相反地,RSEI 的数值愈小且愈接近 0,则意味着生态环境的质量愈差。

3 结果分析

3.1 各指标计算结果

根据表 1 所示,在 2002 年、2007 年、2012 年、2017 年以及 2022 年这 5 个时间段中,可以明显观察到第一主成分(PC1)的特征贡献率均超过了 60%,其中,干度和热度的值为负值,而湿度和绿度的值为正值。综合来看,湿度和绿度对区域生态环境起到正面作用,而干度和热度为负面作用,这与实际情况相符。与其他成分相比,PC1 呈现明显的优势,能够综合 4 个指标的特征信息,并与实际情况相吻合。因此,我们可以运用 PC1 来构建综合生态指数,用以分析研究区的生态环境变化情况。

3.2 生态环境质量评价

通过主成分分析法构建遥感生态指数模型,在 GEE 平台中计算得到韶关市 RSEI。为了揭示过去 20 年韶关市生态环境的变化情况,参考 2015 年国家颁布的《生态环境状况评价技术规范》(HJ192—2015),将韶关市的 RSEI 值分成 5 个等级,如表 2 所示,以 0.2 为间隔,划分 5 个不同生态环境质量等级,即“优”“良”“一般”“较差”“差”。

由图 2 可知,韶关市北部仁化县、西南乳源瑶族自治县、东部始兴县和东南新丰县 RSEI 等级较高,该区域为远离城区,以林地居多,受人类活动的影响较小,生态环境质量等级高;武江区、浈江区和曲江区的交界处,人口密集,城市化水平高度发达,生态等级较低。

由表 3 可知,韶关市生态环境 2002 年生态环境质量等级以良为主。然而,由于快速城镇化与工业化的发展,生态保护被忽略,导致 2007 年生态环境质量出现大幅下降,其中,生态环境质量为良的面积

减少了 5 595.53 km²,占比 42.82%,整体生态环境质量较为一般,但从 2012 年开始,随着国家对生态文明建设的重视和环保意识的增强,韶关市积极响应国家政策,生态环境质量开始稳步提升。至 2017 年,生态环境质量为良的面积增加了 1 921.42 km²,增幅为 19.14%。

表 1 各指标主成分分析

年份	指标	PC1	PC2	PC3	PC4
2002	NDVI	0.488	0.523	0.423	0.556
	LST	−0.572	−0.103	0.813	−0.019
	Wet	0.295	−0.838	0.112	0.445
	NDBSI	−0.589	0.114	−0.384	0.702
	特征值	0.054	0.026	0.014	0.003
	特征贡献率(%)	66.23	16.70	14.14	2.93
2007	NDVI	0.339	0.869	0.173	0.315
	LST	−0.519	0.141	0.799	0.268
	Wet	0.463	−0.473	0.554	−0.504
	NDBSI	−0.633	0.004	−0.157	−0.758
	特征值	0.049	0.026	0.02	0.003
	特征贡献率(%)	60.57	12.32	19.04	8.06
2012	NDVI	0.499	0.485	0.539	0.474
	LST	−0.535	−0.182	0.807	0.168
	Wet	0.323	−0.847	0.107	−0.406
	NDBSI	−0.599	0.11	−0.213	−0.763
	特征值	0.054	0.024	0.152	0.005
	特征贡献率(%)	64.94	14.65	15.40	5.01
2017	NDVI	0.527	0.486	0.459	0.524
	LST	−0.553	−0.012	0.819	0.151
	Wet	0.229	−0.867	0.213	−0.387
	NDBSI	−0.603	0.106	−0.269	−0.742
	特征值	0.053	0.025	0.016	0.004
	特征贡献率(%)	64.23	15.52	15.82	4.43
2022	NDVI	0.529	0.387	0.439	0.614
	LST	−0.548	−0.225	0.804	0.039
	Wet	0.312	−0.889	−0.052	0.329
	NDBSI	−0.567	0.089	−0.37	0.716
	特征值	0.066	0.224	0.01	0.002
	特征贡献率(%)	75.60	12.29	9.97	2.14

表 2 韶关市 RSEI 等级

RSEI 范围	(0.8,1]	(0.6,0.8]	(0.4,0.6]	(0.2,0.4]	[0,0.2]
等级	优	良	一般	较差	差

总体来看,韶关市生态环境质量在 2002—2022 年间的变化趋势为先下降后上升后趋于稳定,这说明韶关市的生态环境保护和发展取得了一定的成绩。此外,从 2020 年韶关市 RSEI 均值来看,等级

为良的占比最大,同时,随着生态环境质量的不断提供,韶关市的农业生产质量也不断提高,在生态环境

质量较高的城镇,当地的农产品的产量和销量都有很大的提高。

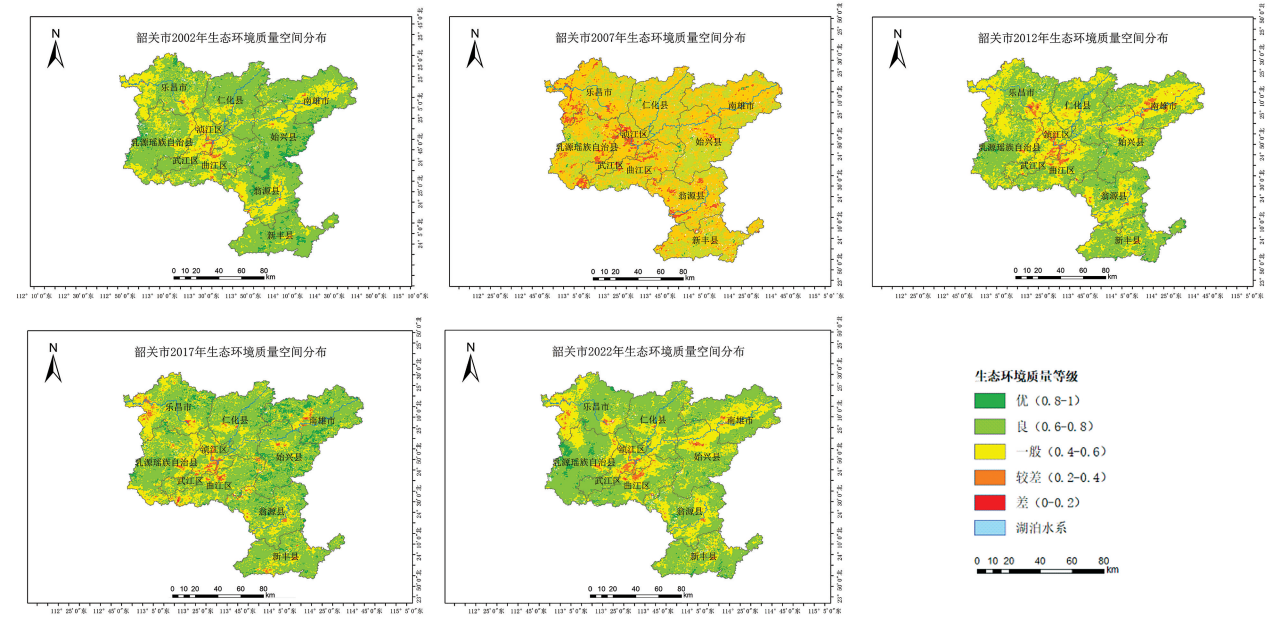


图 2 韶关生态环境质量等级及其空间分布

表 3 韶关市生态环境质量等级面积及占比

RSEI	2002		2007		2012		2017		2022	
等级	面积(km ²)	占比(%)	面积(km ²)	占比(%)	面积(km ²)	占比(%)	面积(km ²)	占比(%)	面积(km ²)	占比(%)
优	789.41	4.29	82.15	0.45	243.99	1.33	1 045.97	5.68	419.58	2.28
良	12 116.01	65.85	6 443.54	35.02	10 037.46	54.55	11 958.89	64.99	11 698.26	63.58
一般	5 264.17	28.61	10 859.70	59.02	7 607.62	41.35	4 948.52	26.89	5 863.44	31.87
中	172.02	0.93	905.21	4.92	478.86	2.60	424.15	2.31	343.00	1.86
差	4.97	0.03	10.77	0.06	15.67	0.09	18.87	0.10	7.33	0.04

3.3 生态环境质量动态变化分析

为了进一步研究韶关市 2002—2022 年生态环境质量变化情况,本实验基于 2002—2022 年 RSEI 分类结果,并监测相应的指数数值变化。首先,计算各相邻年份的 RSEI 指数差值,然后将差值分为了 3

个不同的等级,恶化(≤ -0.1),无明显变化($-0.1 \sim 0.1$),改善(≥ 0.1)。并得到了韶关市不同时期对应的空间分布图(图 3),以及生态环境质量变化情况如表 4 所示。

表 4 2002—2022 年韶关市生态环境质量变化情况

年度	变化趋势	面积(km ²)	百分比(%)	年度	变化趋势	面积(km ²)	百分比(%)
2002—2007 年	恶化	7 865.68	43.14	2012—2017 年	恶化	1 791.47	9.82
	无明显变化	9 757.62	53.51		无明显变化	11 428.58	62.67
	改善	582.12	3.19		改善	5 116.98	28.06
2007—2012 年	恶化	1 472.92	8.08	2017—2022 年	恶化	3 528.58	19.35
	无明显变化	11 641.05	63.84		无明显变化	12 204.33	66.93
	改善	5 127.31	28.12		改善	2 554.69	14.01

由表 4 知,2002—2007 年韶关市生态环境恶化和无明显变化的面积分别为 7 862.68 km²、9 757.62 km²,占总面积的 43.14%和 55.51%,由此可知韶关市 2002—2007 年间的生态环境质量出现了明显的恶化情况。2007—2012 年期间,改善的

面积为 5 127.31 km²,占总面积的 28.12%,整体生态环境质量呈明显改善趋势。2012—2017 年期间,恶化区域占据了 1 791.47 km²,仅占总面积的 9.82%,而改善区域面积达到了 5 116.98 km²,占总面积的 28.06%,因此可以看出在 2012—2017 年

间,韶关市的生态环境质量得到了显著提升。2017—2022 年恶化的面积为 3 528.58 km²,占总面积的 19.35%,因此 2017—2022 年生态环境质量有所下降。由图 3 可知,在韶关市的武江区、曲江区和浈江区等城区是生态环境质量恶化的主要集中地。总体

而言,从 2002—2022 年,韶关市生态环境质量由原先的恶化向着不断改善中稳步发展,也说明近年来,韶关市在环境治理方面取得了显著成果,生态环境得到明显改善。

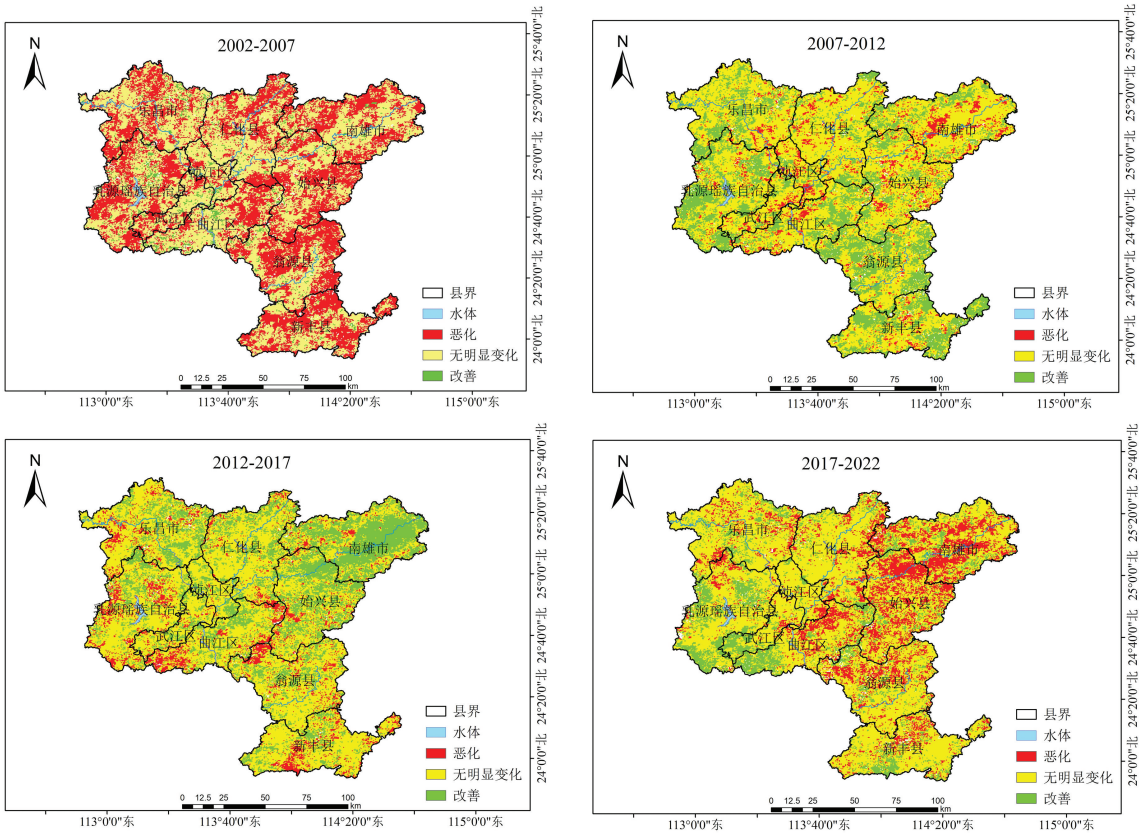


图 3 韶关生态环境质量变化情况

3.4 自然和社会经济因子对生态环境质量的影响

本研究区以乡镇为单位对韶关市自然和社会经济因子对生态环境质量影响开展研究,选取高程、坡度、降水量和人口密度 4 个指标,并通过相关软件计算各个指标在各镇的平均值,通过皮尔逊相关系数法将其与韶关市 RSEI 进行相关性分析。

在皮尔逊相关性分析中^[15],对于两个变量 x 和 y ,通过试验可以得到若干组数据,记为 $(x_i, y_i) (i = 1, 2, \dots, n)$,皮尔逊相关系数定义为估算样本的协方差和标准差的商,则相关系数的数学表达式为:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (7)$$

式中, \bar{x} 、 \bar{y} 分别为 n 个实验值的均值。
 r 的取值范围为 $(-1, 1)$,若 $r > 0$,代表两个变量是正相关;若 $r < 0$,则代表两个变量是负相关, r 的绝对值越大,相关性越强。

通过使用皮尔逊相关系数法,在 origin 软件中

生成相关性分析热图(图 4),研究区生态环境质量与人口密度、高程、坡度、降水量均有显著的相关性,其中 RSEI 与高程、降水量、坡度呈现显著的正相关,相关性系数较大,分别为 0.6、0.4 和 0.66,且都通过了显著性检验($P < 0.05$)这说明随着高程、降水量、坡度的增加,韶关市的生态环境质量呈现逐渐提高的趋势。

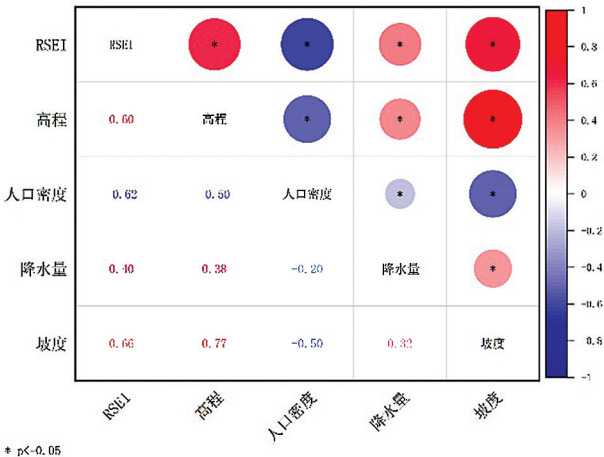


图 4 韶关市 RSEI 相关性分析热图

而研究区 RSEI 与人口密度的相关性系数达到 -0.62 , 显示出较为显著的负相关性, 并经过了显著性检验 ($P < 0.05$)。这说明韶关市的人口密度对其生态环境质量带来了一定的不利影响。这或许主要源于人口持续增长所带来的结果, 人口密度也随之提升, 从而导致资源利用、能源消耗和废物排放等方面的增加。这进一步加重了生态环境的负担, 并引发一系列生态环境污染问题。

4 结论

本研究运用主成分分析法 (PCA) 构建了韶关市不同时期的遥感生态指数 (RSEI), 并基于此探讨了该市生态环境质量的变化和发展趋势, 同时进行了驱动力分析。研究主要发现如下:

(1) 2002—2022 年, 韶关市的生态环境质量经历了由恶化到改善再到趋于稳定的波动起伏状态, 但总体上生态环境质量在不断改善。

(2) 在遥感生态指数中, 绿度和湿度对韶关市生态环境质量起正向作用, 而干度和热度则对韶关市生态环境质量起负向作用。

(3) 对韶关市相邻年份的 RSEI 差值进行运算, 得出 2007—2022 年韶关市的生态环境质量都有较大的改善, 而 2002—2007 年韶关市的生态环境质量有较大幅度的恶化。

(4) 通过对研究区自然环境和人口密度与生态环境质量关系的相关性分析得知, RSEI 与高程、降水量、坡度呈现显著的正相关, 这说明随着高程、降水量、坡度的增加, 韶关市的生态环境质量呈现逐渐提高的趋势, 而 RSEI 与人口密度的相关性系数呈现显著的负相关, 说明随着人口密度不断提高, 对资源利用、能源消耗等方面的增加, 会加重区域生态环境的负担, 从而降低生态环境质量。

参考文献:

[1] 张春桂, 李计英. 基于 3S 技术的区域生态环境质量监测研究[J]. 自然资源学报, 2010, 25(12): 2060-2071.

[2] 程琳琳, 王振威, 田素锋, 等. 基于改进的遥感生态指数的北京市门头沟区生态环境质量评价[J]. 生态学杂志, 2021, 40(4): 1177-1185.

[3] Zawadzka J E, Harris J A, Corstanje R. Assessment of heat mitigation capacity of urban greenspaces with the use of InVEST urban cooling model, verified with day-time land surface temperature data[J]. Landscape and

Urban Planning, 2021(10): 214

[4] Vicente-Serrano M S, Camarero J J, Olano M J, et al. Diverse relationships between forest growth and the Normalized Difference Vegetation Index at a global scale[J]. Remote Sensing of Environment, 2016(187): 14-29.

[5] 高奇, 师学义, 张琛, 等. 县域农业生态环境质量动态评价及预测[J]. 农业工程学报, 2014, 30(5): 228-237, 293.

[6] 张方方, 程先富. 合肥市生态环境质量评价[J]. 石家庄学院学报, 2013, 15(6): 90-93.

[7] 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.

[8] 邢栋, 何浩, 谢贵臣, 等. 基于 RSEI 的乌鲁木齐市生态环境时空变化评价[J]. 城市勘测, 2023(6): 38-43.

[9] 何天星, 田宁, 周锐, 等. 基于 GEE 和 RSEI 的长三角一体化示范区生态环境质量动态评估[J]. 生态学杂志, 2023, 42(2): 436-444.

[10] 苟晓娟, 刘瑞, 李谷琳. 中国西南山地城市生态环境质量长时序变化及其评价: 以重庆市为例[J]. 物探化探计算技术, 2024, 46(2): 224-234.

[11] 陈炜, 黄慧萍, 田亦陈, 等. 基于 Google Earth Engine 平台的三江源地区生态环境质量动态监测与分析[J]. 地球信息科学学报, 2019, 21(9): 1382-1391.

[12] Goward S N, Xue Y, Czajkowski K P. Evaluating land surface moisture conditions from the remotely sensed temperature / vegetation index measurements: An exploration with the simplified simple biosphere model [J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 79: 225-242.

[13] Baig M H A, Zhang L, Shuai T, et al. Derivation of a tasselled cap transformation based on Landsat 8 at-satellite reflectance[J]. Remote Sensing Letters, 2014, 5(5): 423-431.

[14] Huang C, Wylie B, Yang L, et al. Derivation of a tasselled cap transformation based on Landsat7at-satellite reflectance[J]. International Journal of Remote Sensing, 2002, 23(8): 1741-1748.

[15] 董立朋, 聂清浩, 孙晓坤, 等. 基于皮尔逊相关系数法的盾构掘进参数对地表沉降影响分析[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(1): 116-123.

作者简介: 黄承信, 男, 1997 年生, 硕士研究生。研究方向为地球探测与信息技术。曹伙龙 (通讯作者), 男, 1988 年生, 硕士, 工程师。研究方向为土壤学。