

文章编号:1001—7380(2024)02—0021—07

基于 GEE 的仙游县生态环境质量时空异质性分析

徐延芳

(仙游县环境监察大队,福建 莆田 351200)

摘要:基于 Google Earth Engine 平台,构建遥感生态指数(RSEI)评价仙游县 2000—2020 年的生态环境状况,先将仙游县 2000 年,2010 年和 2020 年的 RSEI 分成差、较差、中等、较好和好等 5 个等级进行分级检测,并将仙游县 20 a 的 RSEI 分为 2000—2010 年和 2010—2020 年 2 个研究阶段进行差值检测,以探究仙游县这 20 a 生态环境质量的时空分布特征,其次借助空间自相关分析工具揭示了仙游县 RSEI 的空间分布模式和聚类格局,最后结合土地利用数据分析土地利用变化对生态环境质量的影响。检测结果表明,仙游县 2000 年,2010 年和 2020 年的 RSEI 总体上以好和较好等级为主,2 个等级的占比和分别为 76.09%,73.70%,89.94%,主要分布在仙游县的北部区域,而差和较差等级分布在中部和南部区域。在 2 个研究时期,改善的面积均大于退化的面积,说明仙游县的生态环境质量在逐渐上升;RSEI 的空间分布以高—高聚集和低—低聚集为主,高—高聚集主要分布在仙游县的西北方向,低—低聚集主要分布在木兰河流域附近。2000—2010 年,由建设用地转向其他地类的面积占比最多,为 27.21%,由林地转向其他地类的面积占比最少,为 3.41%;2010—2020 年,由水域转向其他地类的面积占比最多,为 69.64%,由林地转向其他地类的面积占比最少,为 7.85%。耕地和林地转换过程中,生态环境质量均得到了较大的改善,而耕地转为建设用地类型的退化占比分别为 5.53%和 6.78%,是生态等级退化最明显的类型。

关键词:RSEI;生态环境;时空分布;空间自相关;仙游县

中图分类号:F301;F327;P901;Q948.15⁺6

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1001-7380.2024.02.004

Analysis of spatio-temporal heterogeneity of ecological environment quality in Xianyou County based on GEE

Xu Yanfang

(Environmental Supervision Group of Xianyou County, Putian City, Putian 351200, China)

Abstract:Based on the Google Earth Engine platform, a remote sensing ecological index (RSEI) was constructed to evaluate the ecological environment status of Xianyou County in Fujian Province from 2000 to 2020. And the RSEI in 2000, 2010, and 2020 were first classified into five levels: poor, fair, moderate, good, and excellent. The RSEI for 20 years was also divided into two research stages: 2000—2010 and 2010—2020 for difference detection, to explore the spatio-temporal distribution characteristics of ecological environment quality. Then the spatial distribution pattern and clustering pattern of RSEI were revealed using spatial autocorrelation analysis tools. Finally, land use data was combined to analyze the impact of land use changes on ecological environment quality. The results showed that the overall RSEI of Xianyou County in 2000, 2010, and 2020 were mainly at good and excellent grades, accounting for 76.09%, 73.70%, and 89.94%, respectively. They were mainly distributed in the northern region, while poor and fair grades were distributed in the central and southern regions. In both research periods, the improved area was greater than the degraded area, indicating the ecological environment quality gradually improving. The spatial distribution of RSEI was mainly characterized by high-high clustering and low-low clustering. High-high clustering was mainly distributed in the northwest direction, while low-low clustering was mainly distributed near the Mulan River basin. From 2000 to 2010, the proportion of land converted from construction land to other land types was the highest at 27.21%, while the proportion of land converted from forest land to other land types was the

收稿日期:2024-01-24;修回日期:2024-02-21

作者简介:徐延芳(1975—),女,莆田仙游人,助理工程师。研究方向:生态环境质量影响评价。

lowest at 3.41%; From 2010 to 2020, the area transformation from water bodies to other land types accounted for the highest proportion at 69.64%, while the area from forest land to other land types accounted for the lowest proportion at 7.85%. During the conversion process, the ecological environment quality of cultivated land and forest land has been greatly improved, and the proportion of degradation from cultivated land to construction land was 5.53% and 6.78%, respectively, as the most obvious type of ecological grade degradation.

Key words: RSEI; Ecological environment; Spatio-temporal distribution; Spatial autocorrelation; Xianyou County

生态环境是自然-社会-经济条件下的综合产物,是人类生存的基本保障和社会发展的物质基础。随着社会的发展,部分地区面临着森林丧失,水土流失和城市热岛等环境问题,严重威胁城市生态安全^[1]。一些学者利用遥感技术反演单一环境指数以评价区域生态环境,但由于生态系统的复杂性和多样性,仅采用单一生态指标无法综合评价。鉴于此,徐涵秋利用主成分分析法耦合了自然生态系统中绿度、湿度、干度和热度等指标构建遥感生态指数(RSEI)^[2],该指数与国家环境保护部推出的生态环境状况指数(EI)相比^[3],可以弥补EI人为主观权重设定、指标获取难、结果无法进行可视化的不足,能对区域生态环境的时空动态状况进行客观定量评价,被广泛应用于流域^[4-5]、水土流失区^[6]和干旱区^[7]的生态效应评估中,且取得很好的成效。如今,谷歌地球引擎(GEE)作为一个高效的计算云平台,存储了丰富的历史影像,可以快速批量处理遥感图像,与传统遥感技术手段相比,更适用于长时期、大规模的RSEI构建和生态环境评价^[8]。

生态环境作为地理要素,符合地理学第一定律^[9],受到研究尺度的影响,在时空上存在一定的相关性,而空间自相关分析在揭示空间数据的相关特性方面具有良好优势,被学者广泛应用于探究生态环境要素的时空聚散特征^[10]。且相关研究表明,生态环境质量与土地利用之间存在复杂且非线性的动态关系,人类通过改变区域的土地利用类型、数量、结构和功能等方式,将导致生态环境质量逐步恶化^[11-12]。仙游县作为木兰溪源省级自然保护区的所在地,紧紧围绕创建“两山”实践创新基地和国家生态文明建设示范县,一直在优化改善生态环境。若能及时探讨仙游县生态环境质量时空分异特性,揭示土地利用类型变化对其的影响关系,对持续推进仙游县协调发展,努力打造生态样板之城具有重要指导意义。

因此,本文基于GEE平台构建RSEI,对仙游县2000—2020年生态环境质量进行时空动态监测和定量评价,借助ArcGIS软件的空间自相关工具从像

元尺度探究生态环境质量的空间分布模式,并构建土地利用转移矩阵揭示土地利用变化对生态环境质量的影响,以期仙游县生态环境保护 and 可持续发展提供参考。

1 研究区概况

仙游县隶属福建省莆田市,地处福建省东南沿海中部,木兰溪中、上游,位于东经118°27'—118°56',北纬25°11'—25°43'之间,属亚热带海洋性季风气候,辖街道1个、镇12个、乡5个,总面积1 835 km²。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源及预处理

遥感影像来源于GEE平台数据库中T1级别的Landsat5/7/8地表反射率数据产品,空间分辨率30 m,时间分辨率16 d,已经过几何校正、辐射定标和大气校正。基于GEE平台的Java Script编程,使用官方提供的Landsat云掩膜算法合成成像时间为目标年份及其前后1 a的植被季节生长季(4—10月)的均值影像。此外,为避免大片的水域对主成分荷载分布的影响,采用MNDWI水体指数掩膜水体信息^[13]。影像的去云、中值合成、镶嵌、裁剪和去除水体等预处理操作在GEE云端完成^[14]。

2.2 研究方法

2.2.1 RSEI计算 基于遥感生态指数对仙游县的生态环境质量进行综合评价,该指数由遥感影像反演出的绿度、湿度、干度和热度等4个单一指标,经归一化处理后再通过主成分分析耦合构建而成。为了便于指标的度量和比较,同样对RSEI进行归一化处理:

$$RSEI = (RSEI - RSEI_{\min}) / (RSEI_{\max} - RSEI_{\min})$$

RSEI值介于[0,1]之间,RSEI越接近1,表示生态环境质量越好;反之,表示生态环境质量越差。

(1)绿度指标。在众多植被指数中,归一化植被指数(NDVI)是表征植被生长和覆盖状况的最佳指示因子之一^[15]。其计算表达式为

$$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R)$$

NIR 为近红外波段的反射率值; R 为红外波段的反射率值。

(2) 湿度指标。植被和土壤中均存在有效水分, 可以采用缨帽变换技术对遥感影像进行数据压缩和去冗余, 从而得到湿度分量 (WET)^[16]。其计算式为

$$WET = 0.031\ 5\rho_1 + 0.202\ 1\rho_2 + 0.301\ 2\rho_3 + 0.159\ 4\rho_4 - 0.680\ 6\rho_5 - 0.610\ 9\rho_7$$

式中, ρ_i ($i = 1, 2, 3, \dots, 5, 7$) 分别为 Landsat TM/ETM 影像各对应波段的反射率。

(3) 干度指标。地表的裸露和干燥表征为干度, 城市中大量的不透水面和裸土均会导致地表干化, 因此采用建筑指数和裸土指数合成干度指数 ($NDBSI$)^[17]。其计算式为

$$NDBSI = (IBI + SI)/2$$

式中, IBI 为建筑指数, SI 为裸土指数。

(4) 热度指标。地表温度 (LST) 影响着地表与大气之间的能量交换和水汽循环, 是反映城市热岛效应的重要参数^[18], 采用大气校正法反演 LST 。其计算式为

$$LST = T / [1 + (\lambda T / \rho) \ln \varepsilon]$$

式中, T 为传感器处温度值; λ 为热红外 $ETM+6$ 波段的中心波长 ($\lambda = 11.45\ \mu m$), $\rho = 1.438 \times 10^{-2}\ mK$, ε 为地表比辐射率。

2.2.2 空间自相关分析 空间自相关可反映区域中的某种属性与邻近单元相同属性的相关程度, 评价空间自相关性的方法可分为全局空间自相关和局部空间自相关: 全局空间自相关仅能从整体上验证区域中某一属性的空间相关程度, 而局部空间自相关可以局部反映区域单元上的某一属性与相邻区域单元上同一属性的聚集或分散程度^[19]。本文将研究区划分成 $1\ 000\ m \times 1\ 000\ m$ 的单元网格, 分别运用全局空间自相关、局部空间自相关来分析研究区 $RSEI$ 的空间分布格局。全局空间自相关的 $Moran's\ I$ 计算表达式为

$$Moran's\ I = \frac{N \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N w_{ij} (x_i - \mu) (x_j - \mu)}{(\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N w_{ij}) \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}$$

式中, w_{ij} 为空间权重函数, x_i 和 x_j 表示第 i 或 j 地区/栅格的 $RSEI$ 值, μ 是所有地区/栅格的 $RSEI$ 平均值, N 表示地区/栅格的总数量。 $Moran's\ I$ 介于 -1 到 1 之间, 大于 0 且越接近于 1, 说明某一属性

的正相关性越强, 空间分布越聚集; 小于 0 且越接近于 -1, 说明某一属性的负相关性越强, 空间分布越离散; 等于 0, 说明不存在相关性, 空间分布呈随机状态。

局部空间自相关是将 $Moran's\ I$ 分解到各个空间单元。对于某一个空间单元 i , 局部空间自相关计算表达式为

$$I_i = \frac{x_i - \mu}{\sum_{j=1}^N (x_j - \mu)^2} \sum_{j=1}^N w_{ij} (x_j - \mu)$$

式中, 正的 I_i 值表示该栅格单元周围存在相同的聚集, 即高—高聚集和低—低聚集; 负的 I_i 值则表示存在相反的聚集, 即高—低聚集和低—高聚集。

3 结果与分析

3.1 生态环境质量的时空变化动态分析

3.1.1 遥感生态指数的空间分布规律 通过 GEE 平台计算得到仙游县 2000 年、2010 年和 2020 年的遥感生态指数, 为可视化和定量化仙游县的生态环境状况, 将 2000 年、2010 年、2020 年的 $RSEI$ 值以 0.2 为间隔分成差、较差、中等、较好和好 5 个等级 (如图 1), 并统计各等级的面积及占比 (见表 1)。仙游县 2000 年、2010 年、2020 年的 $RSEI$ 总体上以好和较好等级为主, 面积和分别为 718.05, 695.49, 848.79 km^2 , 占比和分别为 76.09%, 73.70%, 89.94%, 其中等级好的 $RSEI$ 在逐渐递增。中等等级的 $RSEI$ 在逐年递减, 2000 年、2010 年和 2020 年的面积占比分别为 14.24%, 12.88% 和 6.75%。而差和较差等级的 $RSEI$ 占比较少, 2000 年、2010 年和 2020 年的面积和分别为 91.28, 126.70, 31.26 km^2 , 面积和占比分别为 9.67%, 13.43%, 3.31%。从空间上看, 总体上好和较好等级主要分布在仙游县的北部区域, 差和较差等级分布在中部和南部区域。在 2010 年, 好和较好等级的 $RSEI$ 较破碎分布在仙游县北部的西苑乡、社硎乡、菜溪乡和石苍乡, 在中南部的木兰溪流域附近分布着差和较差等级的 $RSEI$ 。2010 年, 等级好的 $RSEI$ 在北部边缘区域的面积有所扩大, 同时等级差的 $RSEI$ 在木兰溪流域附近的范围也扩大。2020 年, 西北方向的度尾镇、大济镇、西苑乡、社硎乡、菜溪乡和石苍乡等乡镇分布着大片等级好的 $RSEI$, 木兰溪流域附近的 $RSEI$ 仍为差和较差等级, 但范围有所缩小。

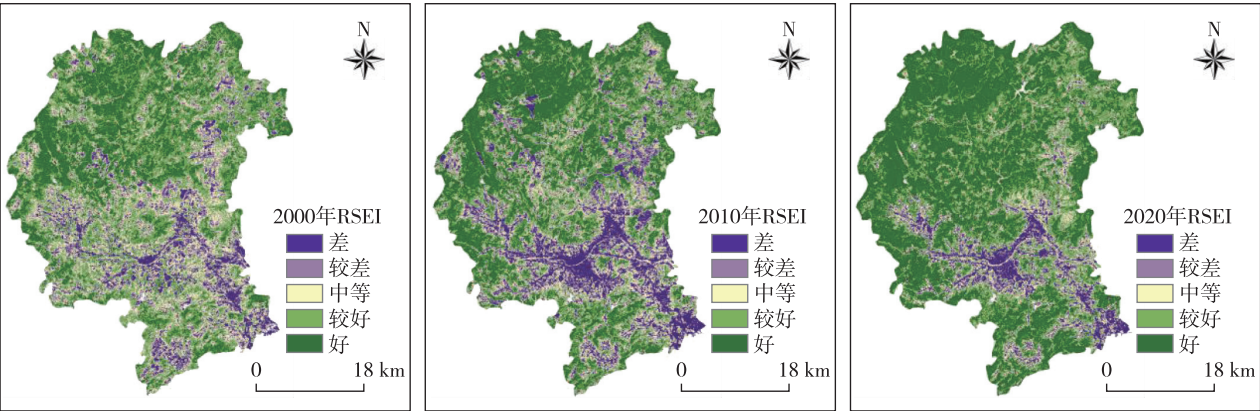


图 1 仙游县 RSEI 分级分布

表 1 仙游县 RSEI 各生态等级的面积及占比

等级	2000 年 RSEI		2010 年 RSEI		2020 年 RSEI	
	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%
差(0.0—0.2)	29.54	3.13	56.91	6.03	7.56	0.80
较差(0.2—0.4)	61.74	6.54	69.79	7.40	23.70	2.51
中等(0.4—0.6)	134.39	14.24	121.53	12.88	63.67	6.75
较好(0.6—0.8)	339.73	36.00	246.95	26.17	251.69	26.67
好(0.8—1.0)	378.32	40.09	448.54	47.53	597.10	63.27

3.1.2 遥感生态指数的时间分布规律 为分析仙游县 2000—2020 年生态环境质量的动态变化,将仙游县 20 a 的 RSEI 分为 2000—2010 年和 2010—2020 年 2 个时间段进行差值变化检测(如图 2),并统计 2 个时段的 RSEI 变化检测结果(见表 2)。可以看出,2000—2010 年,不变类别的面积最多,为 826.19 km²,占比 45.14%,不变区域主要分布在仙游区北部方向的西苑乡、菜溪乡和石苍乡;其次是改善类别的面积,为 532.24 km²,占比 29.08%,改善区域主要分布在仙游县西部的度尾和大济镇及南部的园庄镇;退化区域面积最少,为 472.02 km²,占比 25.79%,退化区域主要分布在木兰溪流域,改善的面积大于退化的面积,说明仙游县的生态环境质量呈上升的趋势。2010—2020 年,3 种变化类别的面积占比由大到小分别为不变、改善、退化,生态环境质量不变的类别分布在仙游县北部的大部分区域,面积为 934.38 km²,占比为 51.09%;改善的区域分布在仙游县的中部和南部区域,面积为 752.21 km²,占比为 41.13%;退化的面积仅为 142.19 km²,占比为 7.77%,零星分布在研究区内,改善的面积远远大于退化的面积,说明仙游县的生态环境质量呈上升的趋势。可见,仙游县这 20 a 的

生态环境质量呈逐渐向好的趋势。

表 2 仙游县 2000—2020 年 RSEI 变化检测统计

类别	2000—2010 年		2010—2020 年	
	类面积/km ²	占比/%	类面积/km ²	占比/%
退化	472.02	25.79	142.19	7.77
不变	826.19	45.14	934.38	51.09
改善	532.24	29.08	752.21	41.13

3.2 遥感生态指数的空间分布模式分析

将仙游县按照 1 000 m×1 000 m 尺度划分为 1 820 个单元,计算仙游县 2000 年、2010 年和 2020 年 RSEI 的空间相关性。从表 3 可以看出:所有尺度在 1% 显著性水平下,都通过显著性检验,2000 年、2010 年和 2020 年 RSEI 的 Moran's I 分别为 0.388, 0.418, 0.468,表明仙游县的生态环境空间格局呈现高度的空间聚集特征,即邻近的区域相对集聚。由 RSEI 的局部自相关结果(见图 3)可以看出,3 个年份 RSEI 的空间分布以高—高聚集和低—低聚集为主,在研究区内零散分布着极小部分的高—低聚集和低—高聚集,高—高聚集主要分布在仙游县的西北方向,该区域由于植被覆盖高,受人类影响程度低,生态环境质量较好,其附近被高值所包围;低—低聚

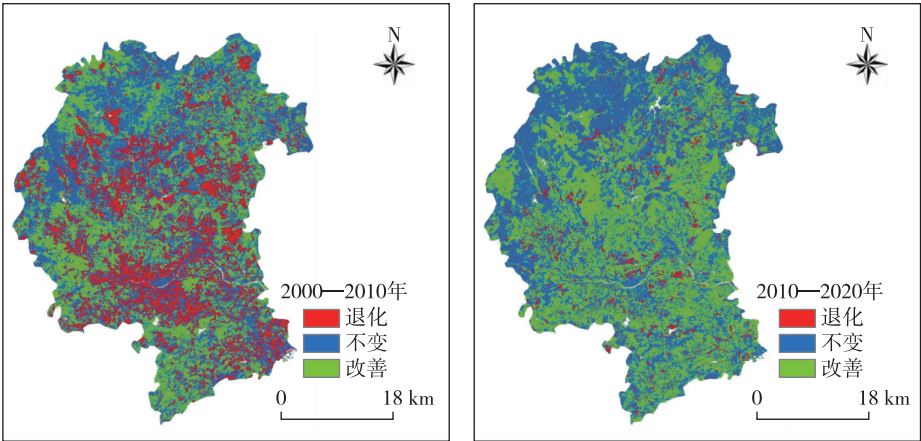


图 2 仙游县 2000—2020 年的 RSEI 变化检测

集主要分布在木兰溪流域附近,说明该区域的 RSEI 较低,且被附近的低值包围;从 2000 年到 2010 年,高一高聚集和低—低聚集的范围均有所扩大,从 2010 年到 2020 年,高一高聚集范围有所扩大,低—低聚集范围有所缩小。统计 RSEI 各聚集类别的面积及占比(见表 4)。2000 年,高一高聚集和低—低聚集的面积分别为 201, 177 km², 占总面积的 11.04% 和 9.73%,

高一低聚集和低—高聚集面积较小,分别占总面积的 2.14% 和 1.87%,不显著的面积最大,占总面积的 75.22%;2009 年,高一高聚集和低—低聚集的面积分别为 204, 207 km², 占总面积的 11.21% 和 11.37%;2020 年,高一高聚集和低—低聚集的面积占比均为 10.77%,其他聚类的面积与 2000 年和 2009 年相差不大。

表 3 仙游县全局空间自相关参数

研究尺度	2000 年 RSEI			2010 年 RSEI			2020 年 RSEI		
	Moran's I	Z 得分	p 值	Moran's I	Z 得分	p 值	Moran's I	Z 得分	p 值
1 000 m×1 000 m	0.388	22.859	0	0.418	24.657	0	0.468	27.608	0

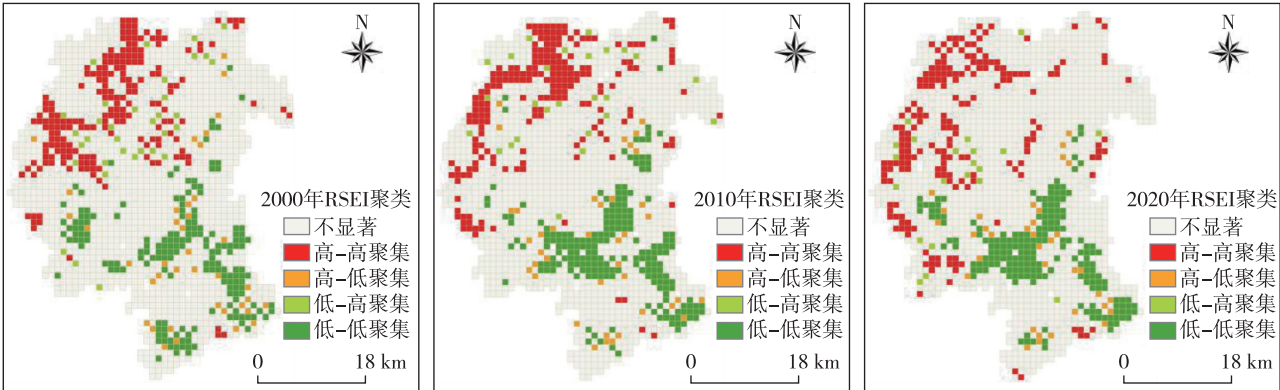


图 3 仙游县 1 000 m×1 000 m 尺度下 RSEI 局部空间自相关分布

表 4 仙游县 RSEI 局部空间自相关类型

类别	2000 年 RSEI		2009 年 RSEI		2020 年 RSEI	
	面积/ km ²	占比/ %	面积/ km ²	占比/ %	面积/ km ²	占比/ %
高-高聚集	201	11.04	204	11.21	196	10.77
高-低聚集	39	2.14	39	2.14	35	1.92
低-高聚集	34	1.87	26	1.43	21	1.15
低-低聚集	177	9.73	207	11.37	196	10.77
不显著	1 369	75.22	1 344	73.85	1372	75.38

3.3 土地利用类型变化对生态质量变化的影响分析

土地利用类型的变化会引起区域内物质循环和能量转变,给区域的环境、经济和社会带来严重的影响。利用转移矩阵模型对 2000—2010 年和 2010—2020 年的土地利用数据进行叠加,揭示仙游县土地利用类型变化的转移轨迹(如图 4),并分类

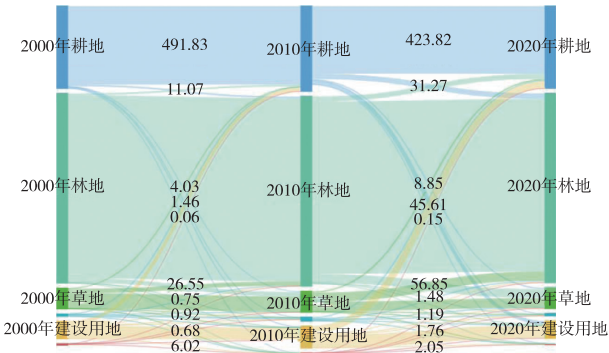


图 4 仙游县 2000—2020 年土地利用转移矩阵/km²

汇总不同土地利用类型不同生态等级的面积及占比(见表 5),分析仙游县不同土地利用变化对生态环境质量的影响。不同土地利用转移矩阵结果表明:2000—2010 年,5 种地类大部分面积的性质没有发生改变,耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用土地在内部之间转换的面积占比分别为 95.44%,96.59%,75.10%,80.07%,72.79% 和 76.76%。由建设用地转向其他地类的面积占比最多,为 27.21%,其中,建设用地转向耕地的面积最多,为 25.49 km²,占比为 23.72%,其次是建设用地转向林地,面积为 2.69 km²,占比为 2.51%。由林地转向其他地类的面积占比最少,为 3.41%,其中,

林地转向草地的面积最多,为 27.06 km²,占比为 2.28%,其次是林地转向耕地,面积为 11.07 km²,占比为 0.93%。2010—2020 年,耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用土地在内部之间转换的面积占比分别为 86.26%,92.15%,45.97%,30.36%,58.82%和 46.21%。由水域转向其他地类的面积占比最多,为 69.64%,其次是草地转向其他地类,面积占比为 54.03%,由林地转向其他地类的面积占比最少,为 7.85%。不同土地利用类型不同生态等级的面积及占比结果表明:耕地和林地内部之间转换的生态等级变化比较明显,在 2000—2010 年和 2010—2020 年期间,耕地和林地改善等级的占比分别为 10.34%,13.42%和 18.54%,16.92%,说明耕地和林地 在转换过程中,生态环境质量均得到了较大的改善。草地和建设用地内部之间的转换中,生态环境质量退化、不变、改善的面积占比均较小,对仙游县生态环境质量的影响不大。值得注意的是,在 2000—2010 年和 2010—2020 年期间,耕地转为建设用地类型是生态等级退化最明显的类型,占比分别为 5.53%和 6.78%。可见,在经济建设发展的同时,也要注重生态环境的保护,防止生态环境质量进一步退化。

表 5 仙游县 2000—2020 年土地利用变化生态等级统计

土地利用变化	2000—2010 年			2010—2020 年		
	退化占比/%	不变占比/%	改善占比/%	退化占比/%	不变占比/%	改善占比/%
耕地转耕地	7.06	7.83	10.34	2.01	6.45	13.42
耕地转建设用地	5.53	2.66	3.10	6.78	1.11	3.42
林地转林地	10.41	30.17	18.54	3.61	35.52	16.92
草地转草地	1.81	1.67	1.41	0.18	0.76	2.14
建设用地转建设用地	0.90	2.79	0.32	0.14	2.97	1.03
其他	0.02	0.02	0.02	0.01	0.04	0.07

4 结论与讨论

本文基于 GEE 平台构建仙游县 2000—2020 年的 RSEI,首先利用分级检测方法探究了仙游县 20 a 生态环境质量的时空分布特征,接着借助空间自相关分析工具揭示了仙游县 RSEI 的空间分布模式和聚类格局,最后结合土地利用数据分析土地利用变化对生态环境质量的影响。得出以下结论:(1)从空间上看,仙游县 2000 年,2010 年和 2020 年的 RSEI 总体上以好和较好等级为主,占比和分别为 76.09%,73.70%和 89.94%,主要分布在仙游县的

北部区域,差和较差等级分布在中部和南部区域。从时间上看,在 2000—2010 年和 2010—2020 年 2 个研究时期,改善的面积均大于退化的面积,说明仙游县的生态环境质量在逐渐上升。(2)在 1 000 m×1 000 m 的研究尺度下,RSEI 的空间异质性明显,空间分布以高一高聚集和低—低聚集为主,高一高聚集主要分布在仙游县的西北方向,低—低聚集主要分布在木兰溪流域附近。(3)2000—2010 年,由建设用地转向其他地类的面积占比最多,为 27.21%,由林地转向其他地类的面积占比最少,为 3.41%;2010—2020 年,由水域转向其他地类的面积占比最

多,为 69.64%,由林地转向其他地类的面积占比最少,为 7.85%。耕地和林地转换过程中,生态环境质量均得到了较大的改善,而耕地转为建设用地类型的生态退化较严重。

采用主成分分析构建的 RSEI 可以对区域生态环境状况进行客观评价,被广泛推广和应用,也有学者对其进行修改,提出改进遥感生态指数 (Modified Remote Sensing Ecological Index, MRSEI),该指数采用前 3 个主成分的贡献率为权重进行加权求和分析^[20]。但徐涵秋等人基于主成分变换的机理和应用实例对 MRSEI 的合理性进行探讨,结果表明各主成分分量之间互不相关,简单将 3 个主成分加权求和会造成主成分分量之间互相干扰,影响 RSEI 的构建结果^[21]。仙游县 2000—2020 年的生态环境质量整体呈上升趋势,但是在木兰溪流域部分仍属于区域中生态质量最脆弱的地方,应重点加强水资源环境的监测和评估,建立完善的水质监测体系,定期对木兰溪水源地进行监测和评估,及时发现问题和风险,并采取相应措施进行调整和改进。同时要采取措施防止土壤侵蚀和污染,如梯田建设、植被造林、湿地保护等保持水源地周边的自然植被等措施,减少人为破坏,提高水源地的生态功能。土地利用是人类对生态系统最直接的反映^[22],在研究期间,耕地转为建设用地类型是生态等级退化最明显的类型,为避免不合理的土地利用破坏生态环境,应加强土地资源的规划和管理,科学合理划定不同功能区域,如保护区、农业区、工业区等,确保土地利用与生态环境相协调。严格控制非法占用、破坏和污染土地的行为,加强土地执法力度,惩罚违法行为。加强城市绿化建设,如增加城市绿地面积,建设公园、绿化带等绿色空间,提高城市空气质量、水质量和生态系统稳定性。

参考文献:

- [1] 张静,杨丽萍,贡恩军,等.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[J].生态学报,2023,43(5):2114-2127.
- [2] 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.
- [3] 中国环境监测总站.生态环境状况评价技术规范(试行):HJ/T192-2006[S].国家环境保护总局,2006.
- [4] 宗慧琳,张晓伦,袁希平,等.利用 GEE 进行 1990—2022 年小江流域生态环境质量时空格局与演变趋势分析[J/OL].环境科学: 1-21 [2024-01-23]. <https://doi.org/10.13227/j.hjks.202308061>.
- [5] 刘浦东,王远轲,张冬,等.基于多源数据的小清河流域生态环境时空变化分析[J].生态学报,2024,43(2):600-608.
- [6] 张文强,孙从建,李新功.晋西南黄土高原区植被覆盖度变化及其生态效应评估[J].自然资源学报,2019,34(8):1748-1758.
- [7] 王丽春,焦黎,来风兵,等.基于遥感生态指数的新疆玛纳斯湖湿地生态变化评价[J].生态学报,2019,39(8):2963-2972.
- [8] 刘秋华,谢余初,覃宇恬,等.基于 GEE 云计算的南宁市生态环境质量时空分异监测[J].水土保持通报,2023,43(5):121-127.
- [9] 李小文,曹春香,常超一.地理学第一定律与时空邻近度的提出[J].自然杂志,2007,29(2):69-71.
- [10] 侯会延,李彤,贾宝全,等.黄土高原沟壑区生态用地空间格局变化分析——以陕西省洛川县为例[J].水土保持研究,2024,31(2):321-330.
- [11] 刘渺渺,梁冠敏,肖瑶,等.闽三角林地景观结构与功能连接度的空间耦合关系[J].生态学报,2023,43(24):10464-10479.
- [12] 陈智勇,吴耀炜,林港特,等.基于遥感生态指数的粤港澳生态环境质量与土地利用变化空间关系[J/OL].环境科学: 1-21 [2024-01-23]. <https://doi.org/10.13227/j.hjks.202310211>.
- [13] 徐涵秋.水体遥感指数研究进展[J].福州大学学报(自然科学版),2021,49(5):613-625.
- [14] 宗慧琳,张晓伦,袁希平,等.利用 GEE 进行 1990—2022 年小江流域生态环境质量时空格局与演变趋势分析[J/OL].环境科学: 1-21 [2024-04-25]. <https://doi.org/10.13227/j.hjks.202308061>.
- [15] 王彤新,李莎,左婵,等.近 20 年荆州市归一化植被指数时空演变特征及其对空气质量的影响[J].中国城市林业,2023,21(6):1-11.
- [16] TODD S W, HOFFER R M. Responses of spectral indices to variations in vegetation cover and soil background[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 1998, 64(9): 915-921.
- [17] 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.
- [18] 徐涵秋.Landsat 8 热红外数据定标参数的变化及其对地表温度反演的影响[J].遥感学报,2016,20(2):229-235.
- [19] 赵红星,石璟晶,何瑞春,等.“一带一路”沿线省域交通碳排放影响因素时空异质性[J/OL].环境科学: 1-17 [2024-01-23]. <https://doi.org/10.13227/j.hjks.202308121>.
- [20] 宋美杰,罗艳云,段利民.基于改进遥感生态指数模型的锡林郭勒草原生态环境评价[J].干旱区研究,2019,36(6):1521-1527.
- [21] 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.
- [22] 马林,梁勇,张雅芹,等.基于 RSEI 的山东省不同土地覆盖区生态环境质量变化特征及驱动因素[J].水土保持研究,2024,31(2):389-400.