

2000—2020 年滇中城市群生态环境质量 动态监测及空间格局演变

丁雪^{1,2,3}, 冯婧文⁴, 黄园园⁴, 施骏骋^{1,2,3}, 王金亮^{1,2,3}

(1.云南师范大学 地理学部, 云南 昆明 650500; 2.云南省高校资源与环境遥感重点实验室, 云南 昆明 650500; 3.云南省 地理空间信息工程技术研究中心, 云南 昆明 650500; 4.云南师范大学 信息学院 云南 昆明 650500)

摘要: [目的] 分析生态环境质量时空变化规律及其异质性, 为政府及相关部门制定生态环境保护政策提供科学依据。[方法] 采用 GEE(google earth engine)平台选取滇中地区 2000—2020 年 Landsat 影像, 逐年提取遥感生态指数 RSEI(remote sensing ecological index), 运用冷热点分析、标准差椭圆、生态环境重心转移等空间分析方法探索生态环境质量的时空演变规律。[结果] ①滇中城市群整体生态环境质量总体呈不断下降趋势, RSEI 均值从 2000 年的 0.51 下降到 2020 年的 0.46。②从空间分布上看, 除个别年份外总体上滇中东部地区生态环境质量明显好于西部地区, 生态环境质量较好的区域大多森林覆盖率较高。③近 20 a 来滇中城市群生态环境空间分布呈南—北方向, 同时城市群生态环境质量整体呈现出一定的聚集性。[结论] 滇中城市群生态环境变差与城市群建成区高速扩展, 气候异常, 植被破坏, 水土流失加剧等有着密切的关系, 为此应加强生态建设, 提升滇中城市群生态环境质量。

关键词: GEE; 遥感生态指数(RSEI); 滇中城市群; 时空特征; 空间格局演变

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2023)03-0096-09

中图分类号: F301, X24

文献参数: 丁雪, 冯婧文, 黄园园, 等. 2000—2020 年滇中城市群生态环境质量动态监测及空间格局演变 [J]. 水土保持通报, 2023, 43(3): 96-104, 128. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.03.013; Ding Xue, Feng Jingwen, Huang Yuanyuan, et al. Dynamic monitoring of ecological environmental quality and spatial pattern evolution of urban agglomeration in Central Yunnan from 2000 to 2020 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(3): 96-104, 128.

Dynamic Monitoring of Ecological Environmental Quality and Spatial Pattern Evolution of Urban Agglomeration in Central Yunnan from 2000 to 2020

Ding Xue^{1,2,3}, Feng Jingwen⁴, Huang Yuanyuan⁴, Shi Juncheng^{1,2,3}, Wang Jinliang^{1,2,3}

(1. Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming, Yunnan 650500, China; 2. Key Laboratory of Resources and Environmental Remote Sensing for Universities in Yunnan, Kunming, Yunnan 650500, China;

3. Center for Geospatial Information Engineering and Technology of Yunnan Province, Kunming, Yunnan 650500,

China; 4. School of Information Science and Technology, Yunnan Normal University, Kunming, Yunnan 650500, China)

Abstract: [Objective] The temporal and spatial variation of ecological environmental quality and its heterogeneity were analyzed in order to provide a scientific basis for the government and relevant departments to formulate ecological environmental protection policies. [Methods] The google earth engine (GEE) platform was used to select Landsat images of central Yunnan Province from 2000 to 2020, and the remote sensing ecological index (RSEI) was extracted year by year. Spatial analysis methods such as hotspot analysis, standard deviation ellipse, and ecological environment gravity center shift were used to explore the temporal and spatial evolution of ecological environmental quality. [Results] ① The overall ecological environmental quality of the central

收稿日期: 2022-03-08

修回日期: 2022-11-09

资助项目: 国家重点研发计划政府间国际科技创新合作重点专项“利用地理空间技术监测和评估土地利用/土地覆被变化对区域生态安全的影响”(2018YFE0184300); 云南省自然科学基金项目(202101AT070052); 云南省教育厅项目(2022J0139); 云南师范大学博士研究生创新基金重点项目(YJSJJ21-A08)

第一作者: 丁雪(1983—), 男(汉族), 云南省陆良县人, 博士研究生, 研究方向为资源环境遥感、遥感智能信息处理。Email: dingxue_1983@163.com。

通信作者: 王金亮(1963—), 男(汉族), 云南省武定县人, 博士, 教授, 主要从事遥感与 GIS 在资源环境方面的应用研究。Email: 1374349752@qq.com。

Yunnan urban agglomeration showed a declining trend, and the average RSEI dropped from 0.51 in 2000 to 0.46 in 2020. ② The ecological environmental quality in Central and Eastern Yunnan Province was obviously better than in the western region, except for a few years. Most of the areas with better ecological environmental quality had greater forest coverage. ③ In the past 20 years, the spatial distribution of the ecological environment of the Central Yunnan urban agglomeration showed a north-south direction, and the overall ecological environmental quality of the urban agglomeration showed a certain degree of aggregation. [Conclusion] The deterioration of the ecological environment of the Central Yunnan urban agglomeration was closely related to the rapid expansion of the built-up areas of the urban agglomeration, climatic anomalies, vegetation destruction, and aggravation of soil erosion.

Keywords: google earth engine; RSEI; Central Yunnan urban agglomeration; spatiotemporal features; spatial pattern evolution

良好的生态环境事关人民的福祉,是区域社会经济可持续发展的重要保障,其重要意义不言而喻。快速准确地监测生态环境质量的变化,可为提前采取有效的保护和预防措施提供必要的技术支撑和决策支持。遥感技术因为具有监测面积广,数据获取方便,时效性好等优势,已被大量学者应用于快速城市化地区土地利用/覆被变化监测^[1-2]、城市热岛效应监测^[3-4]和城市化分析等^[5-6]方面。然而,传统的遥感生态评价方法大部分是基于单一监测指标进行的,难以全面揭示生态环境的系统性变化^[7],而遥感生态指数(remote sensing based ecological index, RSEI)^[8]通过耦合绿度、干度、湿度、热度 4 个指标可快速、全面评价区域生态环境质量,已成为当前生态环境质量监测研究的重要方法^[9-12]。同时,在处理方法上,传统方法不仅存在影像缺失、多云以及由于季节、年份差异导致的拼接色差问题,而且处理流程复杂、工作量繁重、处理结果不精确。谷歌地球引擎(Google Earth Engine, GEE)云平台由于充分集成了 Google Earth 海量的地理和遥感数据资源,并拥有强大云端计算能力,很好的解决了传统方法的弊端^[13-14]。借助 GEE 遥感云计算平台不但能够快速获取相同季节,少云,长时序的影像数据,而且能有效改善影像数据缺失,色差和时间不一致的问题^[15],免去了繁杂的数据处理工作^[16],可快速获得处理结果^[17]。因此,与传统 RSEI 建模相比,GEE 平台更适合作为大区域范围生态环境质量监测与评价的计算平台^[18]。

滇中城市群位于“一带一路”和长江经济带的交汇区域,是全国“两横三纵”城镇化战略格局的重要组成部分,是西部大开发的重点区域,也是云南省建设民族团结进步示范区、生态文明建设排头兵、面向南亚东南亚辐射中心的核心区,在国家开发开放格局中具有重要的战略地位^[19]。伴随着城市化的快速发展,生态环境状况的日益下降,全面掌握滇中城市群

生态环境质量状况的演变规律与特征,对于实现区域可持续发展有着十分重要的意义和价值。

因此,本文借助 GEE 平台提取 2000—2020 年滇中城市群长时间序列的绿度(NDVI)、热度(LST)、湿度(WET)和干度(NDSI)4 个指标,构建遥感生态指数 RSEI 模型对滇中城市群近 20 a 的生态环境质量进行监测^[20],定量分析生态环境质量时空变化规律及其异质性,以期由政府及相关部门制定生态环境保护政策提供科学依据和技术支撑。

1 研究区概况

滇中城市群(100°45′—104°48′E,23°20′—27°02′N)位于云南省中东部地区,由昆明市、曲靖市、玉溪市和楚雄彝族自治州及红河哈尼族彝族自治州北部的蒙自市、个旧市、建水县、开远市、弥勒市、泸西县、石屏县 7 个县市组成,共计 49 个市县,是云南省经济最发达,人口最集中的区域,常住人口 2 000 余万人,GDP 占云南省一半以上,是过去 20 a 来云南省经济发展最为迅速的区域。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

遥感数据采用 GEE 平台提供的 Landsat 影像,分辨率为 30 m,数据采集时间为 2000—2020 年的 3—9 月。其中,2000—2011 年为 Landsat 5 数据,2013—2020 年为 Landsat 8 数据,由于 2012 年 Landsat 7 的数据在 GEE 平台未查询到完整数据,故缺失 2012 年数据。

2.2 研究方法

2.2.1 遥感生态指数 RSEI 主要指标及计算模型如下^[21]:

$$\text{RSEI}_0 = \{1 - \text{PCA}[f(\text{NDVI}, \text{WET}, \text{NDBSI}, \text{LST})]\}$$
$$\text{RSEI} = \frac{\text{RSEI}_0 - \text{RSEI}_{\text{Omin}}}{\text{RSEI}_{\text{Omax}} - \text{RSEI}_{\text{Omin}}} \quad (1)$$

式中:为减少人为主观的赋值,对绿度 NDVI^[22]、湿度 WET^[23]、干度 NDBSI^[24-25]、热度 LST^[26-28] 4 个指标进行主成分分析,集成后得到综合性评价指标。对第一主成分 进行归一化处理,得到量纲后的 值,值域在[0,1]之间,越接近 1 表示生态环境越好,越接近 0 表示生态环境越差。

2.2.2 标准差椭圆 标准差椭圆又名方向分布分析(directional distribution)^[29],是一种空间统计方法,其通过重心、方向角等特征参量,定量的解释要素分布的空间特征^[30],能很好的实现对生态指数时空演变过程的解释^[31]。本文通过利用地理信息系统软件 ArcGIS 10.7 绘制标准差椭圆对滇中城市群近 20 a 生态质量范围和空间重心变化进行探讨^[32],计算公式如下所示^[33-35]。

$$SDE_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (a_i - \bar{a})^2}{n}} \tag{2}$$

$$SDE_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (b_i - \bar{b})^2}{n}} \tag{3}$$

$\tan\theta =$

$$\frac{(\sum_{i=1}^n \tilde{a}_i^2 - \sum_{i=1}^n \tilde{b}_i^2) + \sqrt{(\sum_{i=1}^n \tilde{a}_i^2 - \sum_{i=1}^n \tilde{b}_i^2)^2 + 4(\sum_{i=1}^n \tilde{a}_i \tilde{b}_i)^2}}{2 \sum_{i=1}^n \tilde{a}_i \tilde{b}_i} \tag{4}$$

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n w_{i,j} x_j - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j \sum_{j=1}^n w_{i,j}}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j^2 - \frac{1}{n^2} (\sum_{j=1}^n x_j)^2} \times \sqrt{\frac{n}{n-1} \sum_{j=1}^n w_{i,j}^2 - \frac{1}{n-1} (\sum_{j=1}^n w_{i,j})^2}} \tag{7}$$

3 结果与分析

3.1 滇中城市群生态环境质量变化分析

将滇中城市群近 20 a 的 RSEI 指数进行主成分分析发现,第一主成分 PC₁ 的贡献率均大于 76.98%,而第一主成分集成了 4 个指标的绝大部分特征。因此,RSEI 指数可以用来表示研究区的综合生态环境质量。

从 2000—2020 年整体区域的 RSEI 均值分析结果(图 1)看,研究区近 20 a 总体生态环境质量呈波动下降趋势,生态环境从 2000 年的 0.51 下降到 2020 年的 0.46。其中,2003 年和 2010 年生态环境质量最好,2000,2002,2007 等 3 个年份的生态环境质量相对较好,2019 年生态环境质量最差,2011—2020 年整体区域生态环境相较于 2000—2010 年有明显下降。

式中:SDE_x 和 SDE_y 为标准差椭圆的中心点的坐标;*a_i* 和 *b_i* 为地理要素的坐标; \bar{a} 和 \bar{b} 为地理要素坐标的加权平均中心; θ 为标准差椭圆的方位角; \tilde{a}_i 和 \tilde{b}_i 为标准差椭圆的平均中心偏差。

2.2.3 重心转移模型 重心转移模型,空间重心常被用来研究城市发展和土地类型的转变^[36],通过重心坐标计算公式可以得到空间分布的变化趋势^[37],遥感生态指数的变动能够反映出研究区不同时间生态环境的空间分布差异及运动轨迹。

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n e_i \cdot a}{\sum_{i=1}^n e_i} \tag{5}$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n e_i \cdot b}{\sum_{i=1}^n e_i} \tag{6}$$

式中:(*a*,*b*)为几何重心空间均值;*e_i* 为城市在 *i* 时间的区域面积。当空间均值显著偏离几何中心时,则发生重心偏移现象^[38]。

2.2.4 冷热点分析 冷热点分析,Getis-Ord *G_i^{*}* 热点统计是基于可视化的点模式统计方法^[39],将研究区以单元格的方式划分后利用公式计算出的 *G_i^{*}*,即为对应单元格的热度^[40],Alfeo 等^[41]提出了基于 Stigmergy 效应的检测方法,*G_i^{*}* 的局部统计公式为:

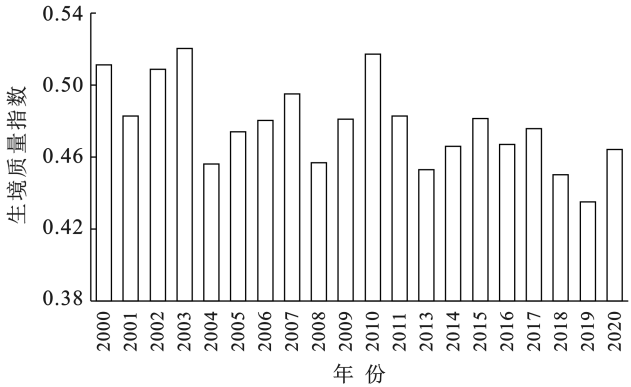


图 1 2000—2020 年滇中城市群遥感生态质量指数均值变化
Fig.1 Changes in mean value of remote sensing ecological quality index of Central Yunnan urban agglomeration from 2000 to 2020

根据 2015 年生态环境状况评价技术规范(试行)和参考相关城市群研究结果,以 0.2 为间隔对 RSEI

指数进行分级,按 $[0, 0.2]$, $[0.2, 0.4]$, $[0.4, 0.6]$, $[0.6, 0.8]$, $[0.8, 1]$ 将滇中城市群 RSEI 分成了差、较差、中等、良、优 5 个等级。近 20 a 整体区域生态环境质量为中等的区域面积最大,比例达到 49.43%;其次为生态环境质量为较差的区域,占 27.5%(图 2);生态环境质量良好的区域,占 19.45%;生态环境质量差的区域,占 2.53%;生态环境质量为优的区域最少,占 1.09%。滇中城市群生态环境质量面积总体比重排序为:中等>较差>良>差>优。

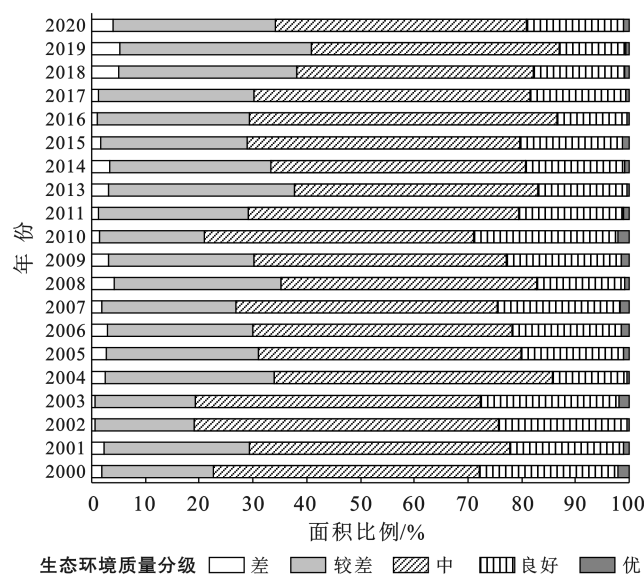


图 2 2000—2020 年滇中城市群生态环境质量分级统计
Fig.2 Statistics on classification of ecological environment quality of urban agglomeration in Central Yunnan from 2000 to 2020

3.2 滇中城市群生态环境空间分布分析

从生境质量指数空间分布上看(图 3),近 20 a 来生态环境较好的区域主要分布在曲靖市的罗平县,昆明市的易门县,玉溪市的峨山彝族自治县、新平彝族傣族自治县,楚雄州的楚雄市、大姚县、姚安县、禄丰市、南华县、双柏县、武定县和禄劝彝族苗族自治县,上述区域常年气候温暖如春,森林覆盖率较高。生态环境较差的区域主要分布在昆明市的官渡区、呈贡区、东川区和石林彝族自治县,楚雄州的元谋县,玉溪市的元江哈尼族彝族傣族自治县,红河州的开远市和建水县,曲靖市的马龙区和陆良县。这与上述区域的地形、地貌以及地表覆盖情况密切相关;其中,昆明市的官渡区、呈贡区是过去 20 a 来城市扩展最快速的地区,建成区面积快速扩张,不透水表面覆盖率较高;东川区位于世界深大断裂带,地质侵蚀严重,裸土较多,地貌植被破坏严重,是泥石流地质灾害多发区;石

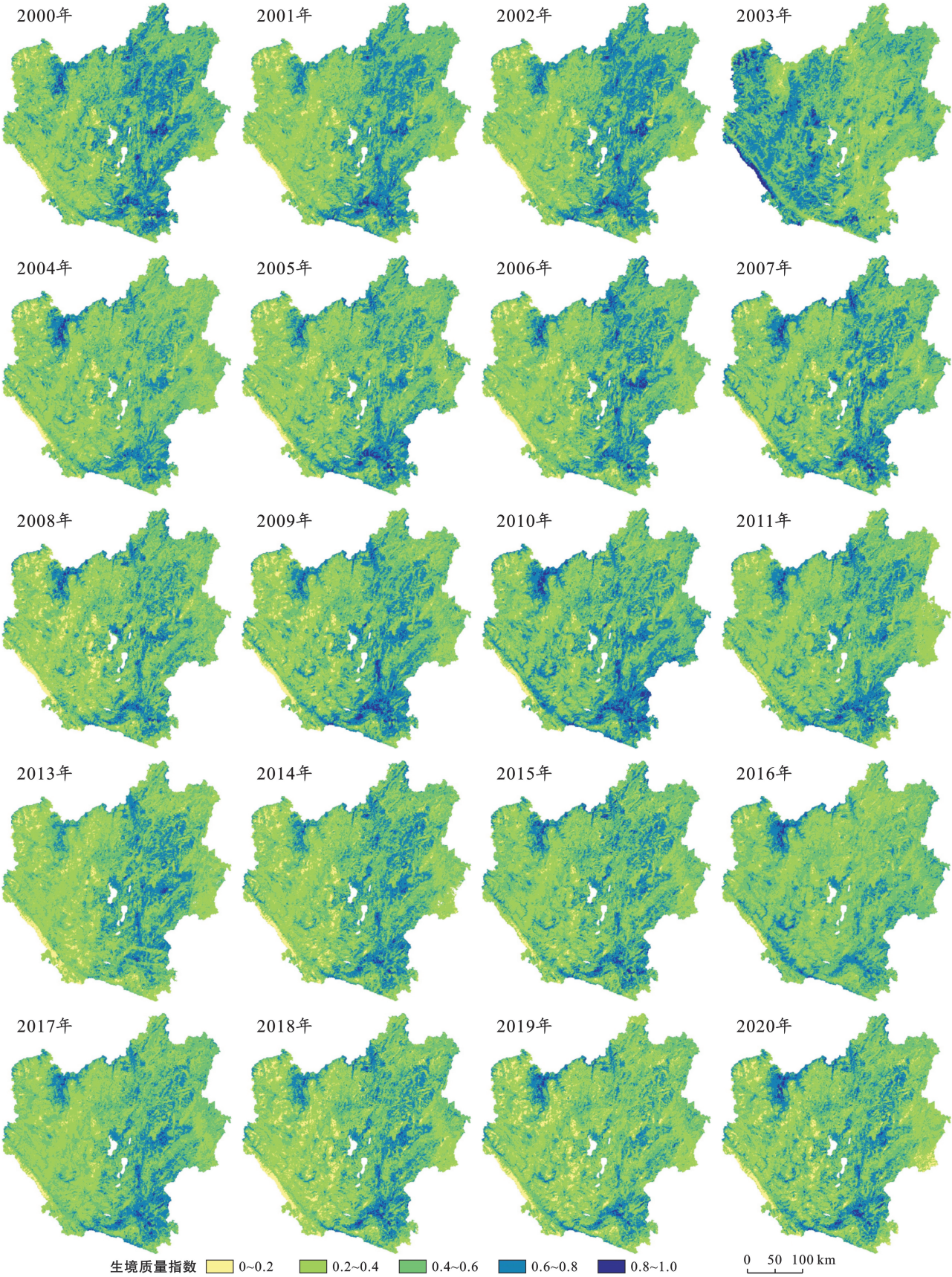
林彝族自治县拥有众多的喀斯特地貌类型,地表以碳酸盐岩石为主,植被较少,属于石漠化地区;玉溪市的元江哈尼族彝族傣族自治县和楚雄州的元谋县位于干热河谷区域、常年炎热少雨;曲靖市的马龙区和陆良县常年气候干燥、植被覆盖率低、地形破碎、水土流失严重;红河州的开远市和建水县则因为常年干旱、少雨导致多干旱现象发生。

3.3 滇中城市群生态环境变化特征分析

为了更好的分析滇中城市群生态环境变化,掌握生态环境质量逐年变化情况,利用 ArcGIS 10.7 的栅格计算器获得 2000—2020 年滇中城市群生态环境质量变化分布(图 4)。

从图 4 中分析可以发现,2002—2005,2006—2007,2009—2010,2011—2013,2015—2016 年滇中城市群各县市生态环境变化幅度较大,大部分 RSEI 值都为负值,生态环境质量变差最为严重。其次是 2013—2014 年生态环境质量持续较差。2019—2020 年,RSEI 变化幅度大都为正值,生态环境明显改善,除滇东部分县外生态环境质量显著提高。其次,2008—2009,2010—2011 年生态环境质量总体有变好趋势。总体上,滇中城市群一半以上的区域生态环境质量绝大部分时间内处于生态环境变差的趋势,这可能由于近 20 年来滇中城市群一直处于城镇化高速扩张状态,人口数量急剧增加,建成区不断向外扩张,植被持续被破坏,从而导致生态环境逐渐变差。近几年来,随着“绿水青山就是金山银山”理念的深入人心与实施,滇中城市群实施了退耕还林还草、退田还湖、开发荒地种植防护林等环境保护手段,整体区域生态环境质量持续向好的趋势发展,生态环境质量不断得到改善。

通过绘制 2000—2020 年滇中城市群生态环境质量的标准差椭圆和空间重心转移的轨迹(图 5),从空间分布视角反映生态环境质量特征及其随时间的变化趋势。2000—2020 年椭圆中心相距较近,长轴均呈现南—北方向,其中,2003 年标准差椭圆向南方向偏移程度相对于其他年份较大,主要的原因在于从 2003 年滇中城市群开始高速城市化扩张。2000—2020 年滇中城市群生态环境质量重心大多数年份位于滇中城市群中心的昆明市官渡区、呈贡区附近,这与标准差椭圆结果相同,反映出了较好的空间一致性。从 20 a 来的变化看,重心基本较为稳定变化幅度较小,整体保持南—北向格局。通过比较发现,标准差椭圆覆盖面积呈现先下降后上升再下降的趋势,总体变化程度较小。



注：本图源于 GEE 平台生成，并基于自然资源部标准地图服务系统 GS(2019)1822 号标准地图制作。下同。

图 3 2000—2020 年滇中城市群生态质量分级

Fig.3 Ecological quality classification of Central Yunnan urban agglomeration from 2000 to 2020

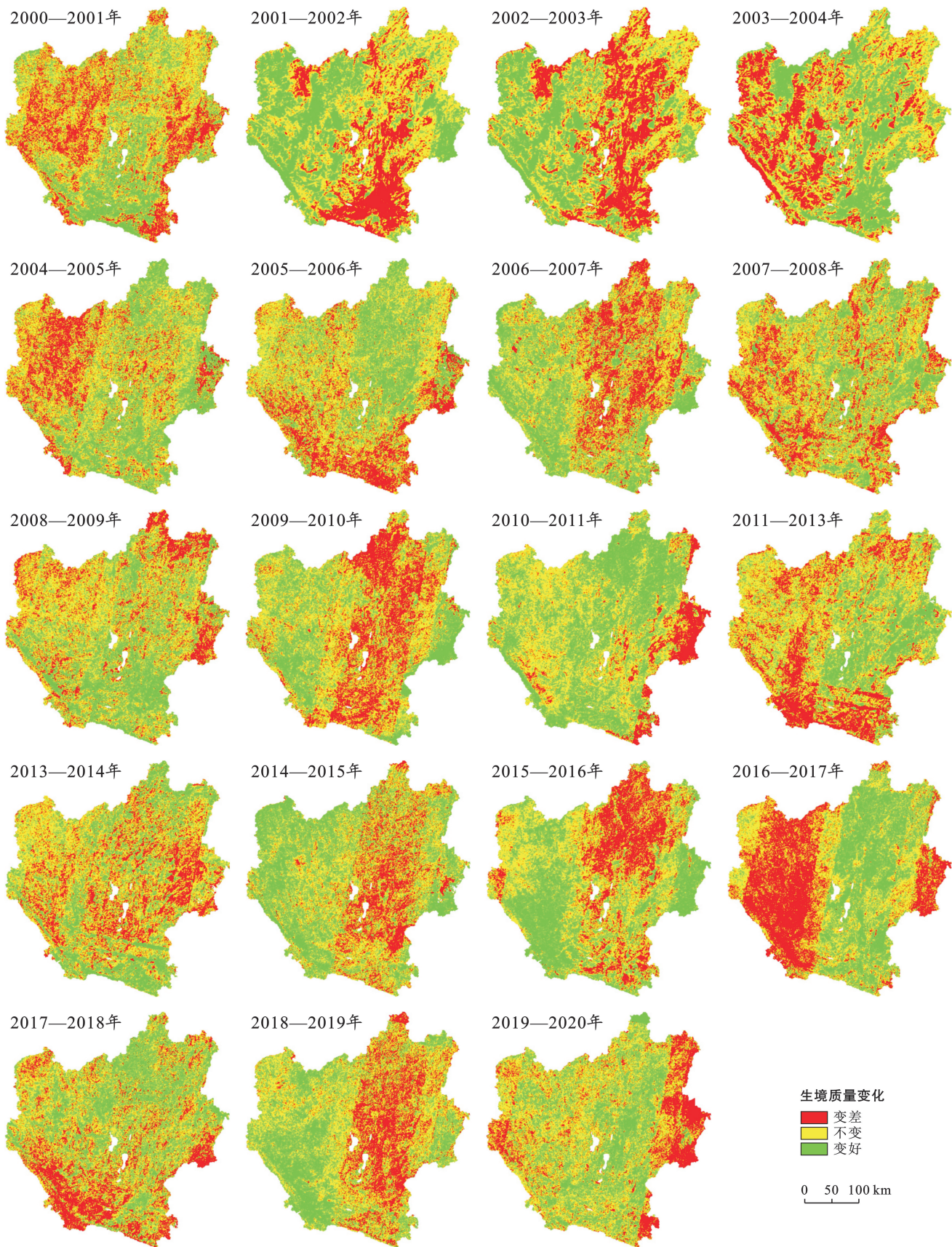


图 4 2000—2020 年滇中城市群生态环境质量变化分布

Fig.4 Distribution of ecological environment changes in Central Yunnan urban agglomeration from 2000 to 2020

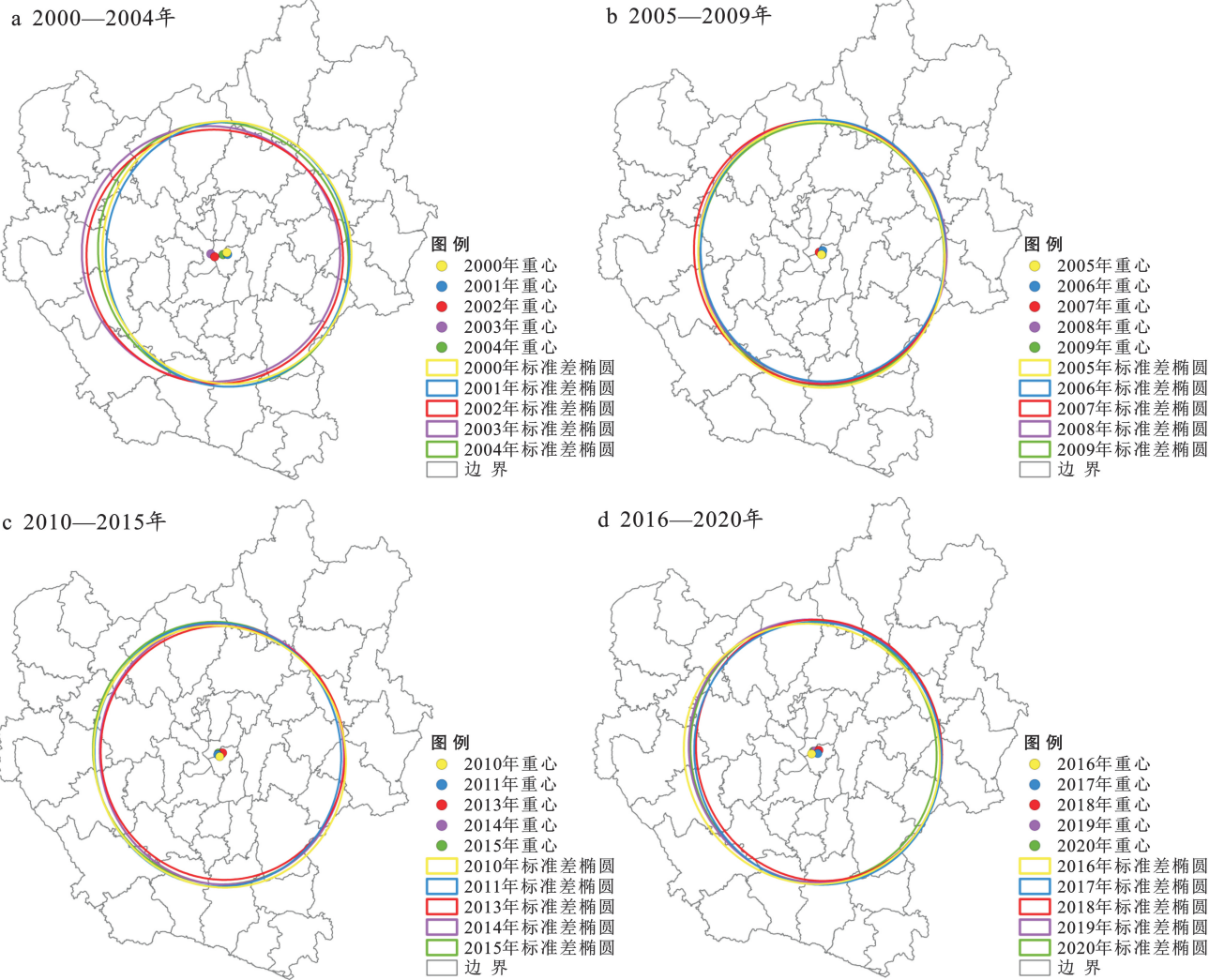


图5 滇中城市群生态环境标准差椭圆变化时间序列

Fig.5 Time series of elliptic changes in standard deviation of ecological environment in Central Yunnan urban agglomeration

基于冷热点空间分析对滇中城市群生态环境质量进行空间自相关性分析,探究滇中城市群生态环境质量分布规律。结果显示(图6),滇中城市群生态环境质量呈现出一定的聚集性,然而不同年份冷热点的空间存在较大差异。除2002,2003,2006,2016,2020这5个年份热点没有明显的聚集效应外,其余年份热点大都集中于滇中南部;其余年份冷点没有明显聚集效应。将图6与图3叠加后发现,热点区域多为生态环境质量较好的区域,冷点区域多为生态环境质量较差的区域。

4 讨论与结论

(1) 近20 a来滇中城市群生态环境质量总体呈现逐年变差趋势,其中2011—2020年区域生态环境相较于2000—2010年下降明显。将生态环境质量分级统

计后发现,滇中城市群生态环境质量面积总体以中等区域为主,比例达到49.43%;其次是生态环境质量较差和好的区域,比例分别为27.5%和19.45%;生态环境质量差和优的区域比例最小,分别为2.53%和1.09%。

(2) 从空间分布上看,除个别年份外总体上滇中东部地区生态环境质量明显好于西部地区,生态环境质量较好的区域大多森林覆盖率较高。从空间聚集情况看,滇中城市群生态环境质量部分年份呈现一定的聚集效应,热点区域的区域多集中于滇中南部;冷点的区域多集中于滇中西北部。

(3) 遥感监测显示,近20 a来滇中城市群中心城区不断高速扩张,并遭遇了百年不遇的极端干旱天气,常年气温偏高、干燥少雨,由此产生的区域植被覆盖率降低、地形破碎、水土流失严重等现象是研究区生态环境变差的主要原因。

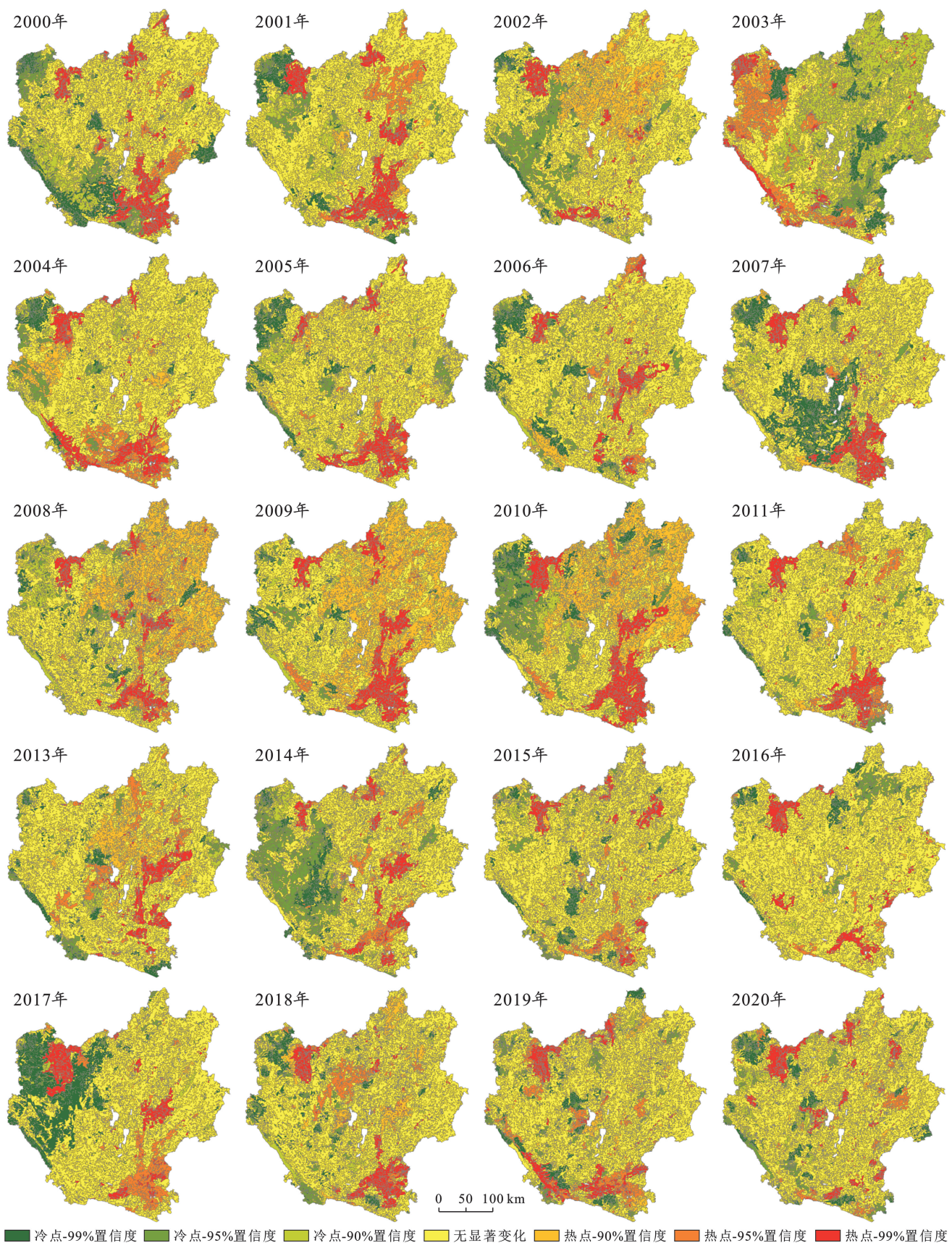


图 6 滇中城市群生态环境质量空间冷热点分布

Fig.6 Spatial distribution of cold and hot spots of ecological environment quality in Central Yunnan urban agglomeration

(4) RSEI 指数只集成了干度、绿度、湿度和温度 4 个指标,对于滇中城市群的自然状况和生态环境的实际情况,还需要进一步结合研究区特点探索更多遥感影像指标以构建与真实生态环境更加贴切的综合遥感生态环境指数,进一步实现对研究区生态环境质量的定量评估。

[参 考 文 献]

- [1] 纪秋磊,梁伟,傅伯杰,等.基于 Google Earth Engine 平台与复杂网络的黄河流域土地利用/覆被变化分析[J].生态学报,2022,42(6):2122-2135.
- [2] 骆剑承,胡晓东,吴田军,等.高分遥感驱动的精准土地利用与土地覆盖变化信息智能计算模型与方法研究[J].遥感学报,2021,25(7):1351-1373.
- [3] 邓玉娇,杜尧东,王捷纯,等.粤港澳大湾区城市热岛时空特征及驱动因素[J].生态学杂志,2020,39(8):2671-2677.
- [4] 杨智威,陈颖彪,吴志峰,等.粤港澳大湾区城市热岛空间格局及影响因子多元建模[J].资源科学,2019,41(6):1154-1166.
- [5] 马廷.夜光遥感大数据视角下的中国城市化时空特征[J].地球信息科学学报,2019,21(1):59-67.
- [6] 王海军,孔祥冬,武克军,等.利用夜光遥感影像进行城市化监测[J].计算机工程与应用,2018,54(12):235-239.
- [7] 孙从建,李晓明,张文强,等.基于遥感信息的吕梁山贫困区生态安全评价[J].中国环境科学,2019,39(12):5352-5360.
- [8] 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.
- [9] 程志峰,何祺胜.基于 RSEI 的苏锡常城市群生态环境遥感评价[J].遥感技术与应用,2019,34(3):531-539.
- [10] 魏雨涵,钱建平,范伟伟,等.基于 RSEI 的漓江流域生态环境质量动态监测[J].中国水土保持科学(中英文),2021,19(1):122-131.
- [11] 杨坤士,卢远,翁月梅,等.Google Earth Engine 平台支持下的南流江流域生态环境质量动态监测[J].农业资源与环境学报,2021,38(6):1112-1121.
- [12] 李婷婷,马超,郭增长.基于 RSEI 模型的贺兰山长时序生态质量评价及影响因素分析[J].生态学杂志,2021,40(4):1154-1165.
- [13] 牟晓莉,李贺,黄翀,等.Google Earth Engine 在土地覆盖遥感信息提取中的研究进展[J].国土资源遥感,2021,33(2):1-10.
- [14] 郝斌飞,韩旭军,马明国,等.Google Earth Engine 在地球科学与环境科学中的应用研究进展[J].遥感技术与应用,2018,33(4):600-611.
- [15] Guo Beibei, Fang Yelin, Jin Xiaobin, 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, 2020,95:104569.
- [16] Shan Wei, Jin Xiaobin, Ren Jie, et al. Ecological environment quality assessment based on remote sensing data for land consolidation [J]. Journal of Cleaner Production, 2019,239:118126.
- [17] 刘盼,任春颖,王宗明,等.南瓮河自然保护区生态环境质量遥感评价[J].应用生态学报,2018,29(10):3347-3356.
- [18] 杨泽康,田佳,李万源,等.黄河流域生态环境质量时空格局与演变趋势[J].生态学报,2021,41(19):7627-7636.
- [19] 云南省人民政府.滇中城市群发展规划[R].云南省,2020.
- [20] Duan Xingwu, Bai Zhiwei, Rong Li, et al. Investigation method for regional soil erosion based on the Chinese Soil Loss Equation and high-resolution spatial data: Case study on the mountainous Yunnan Province, China [J]. Catena, 2020,184:104237.
- [21] 胡思汉,姚玉增,付建飞,等.基于 RSEI 指数的东北矿区生态质量变化评价:以辽宁弓长岭区为例[J].生态学杂志,2021,40(12):4053-4060.
- [22] 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.
- [23] Goward S N, Xue Yongkang, Czajkowski K P. Evaluating land surface moisture conditions from the remotely sensed temperature/vegetation index measurements [J]. Remote Sensing of Environment, 2002,79(2/3):225-242.
- [24] Huang C, Wylie B, Yang L, et al. Derivation of a tasseled cap transformation based on Landsat 7 at-satellite reflectance [J]. International Journal of Remote Sensing, 2002,23(8):1741-1748.
- [25] Hu Xisheng, Xu Hanqiu. A new remote sensing index for assessing the spatial heterogeneity in urban ecological quality: A case from Fuzhou City, China [J]. Ecological Indicators, 2018,89:11-21.
- [26] Roy P S, Rikimaru A, Miyatake S. Tropical forest cover density mapping [J]. Tropical Ecology, 2002,43(1):39-47.
- [27] Nichol J. Remote sensing of urban heat islands by day and night [J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2005,71(5):613-621.
- [28] 徐涵秋,林中立,潘卫华.单通道算法地表温度反演的若干问题讨论:以 Landsat 系列数据为例[J].武汉大学学报(信息科学版),2015,40(4):487-492.
- [29] 程志峰,何祺胜.基于 RSEI 的苏锡常城市群生态环境遥感评价[J].遥感技术与应用,2019,34(3):531-539.