

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2024.02.011

基于景观格局与遥感生态指数的成都市碳排放分析

康森源

(上海同济城市规划设计研究院有限公司, 上海 200092)

摘要: 首先利用景观格局分析方法建立最优的土地利用分类粒度; 随后进行城市生态质量评价并对土地利用分类结果进行碳排放计算, 然后分析成都市各区、县碳排放空间格局变化。分析可得, 30 m 为最佳分类粒度, 2015—2020 年成省市城市整体生态质量得到提升, 各区、县碳排放总量处于增加状态, 且城市生态质量提升区域多处于碳排放增加量大的区域。综上可得, 成都市没有因为城市化进程加快使城市生态质量变差, 而在城市化进程快速区域的生态质量改善明显, 因此成都市整体处于生态改善建设中。

关键词: 景观格局; 空间格局; 遥感生态指数; 生态质量; 碳排放

中图分类号: F301.24

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2024)02-0075-10

引文格式: 康森源. 基于景观格局与遥感生态指数的成都市碳排放分析[J]. 湖南工业大学学报, 2024, 38(2): 75-84.

Analysis of Carbon Emissions in Chengdu Based on Landscape Pattern and Remote Sensing Ecological Index

KANG Senyuan

(Shanghai Tongji Urban Planning and Design Institute Co., LTD., Shanghai 200092, China)

Abstract: By adopting the landscape pattern analysis method, an optimal land use classification granularity is established, with a subsequent urban ecological quality evaluation to be conducted and carbon emissions to be calculated based on land use classification results, followed by an analysis of changes in the spatial pattern of carbon emissions in various districts and counties in Chengdu city. Based on the analysis results, 30 meters is the optimal classification granularity. From 2015 to 2020, the overall urban ecological quality has been improved, with an increase in the total carbon emissions of each district and county. Moreover, the urban ecological quality of the city has been improved mostly in areas with a large increase in carbon emissions. In summary, it can be concluded that Chengdu has not experienced any deterioration in urban ecological quality due to the accelerated urbanization process, but witnessed a significant improvement in ecological quality in areas with rapid urbanization. Therefore, Chengdu is currently in the process of ecological improvement construction as a whole.

Keywords: landscape pattern; spatial pattern; remote sensing ecological index; ecological quality; carbon emission

1 研究背景

自工业革命以来, 全球气候状况日益恶化, 其中

以化石燃料不完全利用所产生的温室气体为主, 同时伴随着人类对土地的不合理利用, 使大气环境中温室气体数量日益增加, 成为影响生态碳储量的首要因

收稿日期: 2022-04-19

作者简介: 康森源, 男, 上海同济城市规划设计研究院有限公司助理规划师, 主要研究方向为遥感与地理信息系统应用,

E-mail: 1052136623@qq.com

素^[1]。经过相关研究分析,土地利用覆被格局的改变会对大气中二氧化碳浓度产生较大影响,同时由土地利用变化引起的碳排放量占据人类活动碳排放总量的1/3,是仅次于化石燃料燃烧产生的第二大影响因素。到20世纪30年代为止,由土地利用变化产生的碳排放量在全球碳循环过程中就保持着较小但持续的影响^[2-3]。陆地生态系统是人类生存与发展的基础,可以为人类生存发展提供空间以及各种资源,同时还具备调节气候、涵养水资源等功能^[4]。土地作为陆地生态系统的重要组成部分,已经成为影响生态循环的关键因子^[5]。当前,全球各国都对碳排放量引起的气候变化高度关注,中国作为世界第一大发展中国家,研究碳排放总量与减碳策略对后续国家可持续发展有着重要的作用^[6]。国内外学者针对土地利用与碳排放做了许多研究,以不同尺度下碳排放格局变化、碳排放影响因素以及碳排放与经济的关系为主,对土地利用与碳排放进行综合分析,不仅可以在时空上反映城市变化,也可间接反映城市经济、生态等重要发展要素的变化^[7-9]。因此,对土地利用进行碳排放研究可为了解不同土地利用状态下的碳排放空间格局以及碳排放效应提供一定的基础^[10]。

在研究土地利用变化过程中,城市景观格局也发生了变化,研究城市发展的景观格局是当今生态学的重点研究内容之一^[11-12]。不同尺度下景观格局对土地利用分析起到一定借鉴作用,如梅绍容等^[13]通过分析景观指数得出最优矿山分析尺度,王甜等^[14]通过景观格局指数得出常州市的最佳研究粒度等。可见,通过分析景观指数可以帮助土地利用研究确定合适的研究粒度,找到最佳的空间分析尺度。

随着中国城市化进程加快,土地利用不合理、生态环境恶化的问题日益严重,通过对土地利用进行科学的生态评估是我国提高生态质量的重要手段之一^[15]。国内外许多学者都针对土地利用变化下的生态环境变化进行了不同程度的研究,其中生态环境评价的重要性引起了学者关注。如E. K. Antwi等^[16]通过使用GIS方法对德国卢萨蒂亚煤矿进行了研究,研究煤矿开采对土地的影响;国内学者郭秋忠等^[17]结合遥感数据与其他辅助信息建立评价模型,对江西东江源区进行生态环境质量评测。因此,通过对土地利用进行科学地生态评价,有利于合理地保护生态,可对碳排放计算与减碳策略的提出起到借鉴作用。

目前,我国城市化进程及经济建设加快,对能源消费产生了一定刺激,使碳排放量持续增长^[18],导致减碳压力加大。国内外学者对土地利用下的碳排放研究进行了大量定量与定性分析。可将土地利用与碳

排放的研究分为3个方面:一是对土地利用变化与碳循环进行研究,如杨亮洁等^[19]通过能源消费与土地利用数据构建土地利用碳排放理论框架与计算模型等。二是对土地利用碳排放核算方法的研究,常见的计算方法模型有Logistic模型、Bookkeeping模型等,如苏雅丽等^[20]通过回归分析、反距离权重法以及Hopfield神经网络模型对陕西省土地利用类型进行碳排放收益计算等。三是对土地利用碳排放的影响因素进行分析,如Xu S. C.等^[21]使用对数平均分级指数模型分析了影响中国碳排放的主要因素等。此外,在不同地理尺度下对碳排放总量进行计算也是目前的一个重要研究方向,如秦岩等^[22]对2000—2018年长三角地区的碳排放强度进行了计算并分析其空间特征,赵荣钦等^[23]通过碳收支计算方法研究了我国县域碳平衡情况等。但目前关于城市碳排放研究分散于各领域中,缺少生态与市域层面的计算研究。

成都市作为四川省重要的经济政治中心,是我国西南地区重要的交通枢纽,也是我国重要的新一线城市之一。已有研究大多没有将生态格局与碳排放空间格局相结合,且研究尺度以省、市为单位,对市内区、县的研究较少。鉴于此,本文拟通过对成都市进行生态评价,并计算各区、县碳排放总量,将生态格局与碳排放分区相结合,进行生态格局下碳排放的空间变化分析,为城市碳排放分区研究提供新视角,也为实现“双碳”战略发展目标提供科学依据与理论支撑。

2 研究区概况与研究数据

2.1 研究区概况

成都市位于四川省中部,地处四川盆地西部地区。地理位置在 $102^{\circ}54'E$ — $104^{\circ}53'E$, $30^{\circ}05'N$ — $31^{\circ}26'N$ 之间,北部与德阳市相接,东部毗邻资阳市,南部与眉山市相邻,西部则与雅安接壤,全市总面积为 $14\,335\text{ km}^2$ 。地势由西向东倾斜,西北高、东南低,全市地貌多样,垂直落差大,最大落差可达 $5\,000\text{ m}$ 。属亚热带湿润季风气候区,年降雨量约为 $1\,000\text{ mm}$,平均气温为 16°C 左右。全年降水丰富,处于多条河流的河网之中,水资源丰富。2021年成都市统计年鉴结果显示,截至2020年末,户籍人口数为 $1\,519.7$ 万人,人口增长迅速;2010年至2020年三产总值增加 $11\,836.18$ 亿元,经济处于高速增长中。在城市经济快速发展过程中,能源消耗量大,生态与人类活动之间的平衡关系值得关注,如何在绿色发展的同时减少能源消耗,尽快实现“双碳”目标是值得关注的问题之一。

2.2 数据来源与处理

本文选取 2015 年与 2020 年两年遥感影像进行土地利用分类, 并进行景观格局分析, 根据分析结果进行生态指数评价以及碳排放总量的计算。遥感影像来源于地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn/>) 中的 Landsat 8OLI_TIRS 数据, 选取月份为 5—9 月, 云量在 15% 以下。分类结果补充数据来自 Open Street Map (OSM) 开源矢量数据。在 ENVI 5.3 中, 先对每景影像进行辐射定标、大气校正等操作, 然后使用随机森林的监督分类方法对两年数据进行分类, 分类体系采用中国科学院资源环境数据库中的土地利用分类体系^[24], 主要分为建设用地、林地、草地、水体、耕地以及未利用土地 6 类。对分类后结果使用 OSM 数据进行补充, 得到最后的分类结果数据。

建设用地碳排放总量数据使用间接算法, 数据来源主要为成都市历年统计年鉴、中国能源统计年鉴以及各县市公开的统计年报数据等。由于万元 GDP 能耗数据无法直接获得, 需使用统计年鉴中国民生生产总值与能源消耗总量进行计算, 又因 2020 年国家能源统计年鉴未公布, 这里选用成都市历年公布的万元 GDP 能耗下降率, 结合已有 2012 年数据对 2015 年、2020 年的数值进行估算, 且有关二三产业地区生产总值以不变价地区生产总值进行收集计算。在对成都市各县市进行分析时, 因 2015 年简阳尚未划入成都市管理范围, 但为了能与 2020 年碳排放空间分布进行更好地对比, 本文在分析 2015 年数据时依旧包含简阳地区, 数据来源于简阳市政府网。

3 研究方法

通过以下 3 个部分对成都市碳排放空间格局进行分析。首先通过景观格局分析选取土地利用分类最优尺度; 其次进行遥感生态指标计算, 并对成都市 20 个县区进行生态评价; 最后根据各县区土地利用分类结果以及成都市统计年鉴与中国能源统计年鉴数据计算各区、县的碳排放总量, 分析成都市各区、县的碳排放空间格局分布情况。

3.1 景观格局分析

1) 景观格局最大斑块指数 LPI 。 LPI 用来反映景观格局中景观所占的优势程度^[25], 该值越大, 在景观中越占优势, LPI 计算式如式 (1) 所示:

$$LPI = \max(S_{ij}) / S_i \times 100. \quad (1)$$

式中: S_i 为第 i 类景观类型面积; S_{ij} 为第 i 类景观中第 j 块图斑面积, 本研究中 i 取 6。

2) 景观格局边界密度 ED 。 ED 是景观格局中的

重要指数之一, 用来分析景观被切割状态^[26], 值越大越破碎, 能够直观反映景观破碎程度, 公式见式 (2):

$$ED = L / S \times 10^6. \quad (2)$$

式中: L 为某类景观斑块的边界长度, m ; S 为景观的总面积, m^2 。

3) 景观格局形状指数 LSI 。 LSI 用来描述斑块边缘的形状复杂程度^[27], 值越大, 形状越复杂, 可反映景观内部特征。该值一般都大于 1, 越接近 1 则表示景观越规整, 公式如式 (3) 所示:

$$LSI = 0.25 \times L / \sqrt{S}. \quad (3)$$

3.2 遥感生态评价模型

遥感生态指数 (remote sensing ecological index, RESI) 能快速评价区域生态质量, 该指标由徐涵秋^[28]提出, 其计算方法是通过对遥感影像进行绿度、湿度、干度及热度指标计算, 然后通过主成分分析将以上 4 个指标集成, 最后实现区域环境生态评价。

1) 绿度指标。绿度指标通过归一化植被指数进行表征^[29], 公式如式 (4) 所示:

$$NDVI = (\rho_{NIR} - \rho_{RED}) / (\rho_{NIR} + \rho_{RED}). \quad (4)$$

式中: $NDVI$ 为归一化植被指数; ρ_{NIR} 、 ρ_{RED} 分别为近红外与红光波段。

2) 湿度指标。湿度指标是通过遥感缨帽变换后的湿度份量进行反映的^[30], 公式如式 (5) 所示:

$$Wet = 0.1511\rho_{NIR} + 0.1972\rho_{green} + 0.328\rho_{red} + 0.3407\rho_{NIR} - 0.7117\rho_{SWIR1} - 0.4559\rho_{SWIR2}. \quad (5)$$

式中: Wet 为湿度指标; ρ_{NIR} 、 ρ_{red} 、 ρ_{blue} 、 ρ_{green} 、 ρ_{SWIR1} 、 ρ_{SWIR2} 分别为近红外、红光、蓝光、绿光、短波红外 1 和短波红外 2 波段。

3) 干度指标。建筑用地以及不透水层的增加会导致地表干化, 因此选用建筑指数 (integrated building in telligence, IBI) 与裸土指数 (soil index, SI) 进行合成^[31], 公式如式 (6) 所示:

$$NDSI = IBI + SI / 2. \quad (6)$$

式中: $NDSI$ 、 IBI 、 SI 分别为干度指标、建筑指标以及裸土指数。

4) 热度指标。热度指标是通过反演后的地表温度进行表征的^[32], 公式如式 (7) ~ (9) 所示:

$$L_\lambda = [\varepsilon B(T_s) + (1 - \varepsilon)L_\downarrow] \tau + L_\uparrow; \quad (7)$$

$$B(T_s) = L_\lambda - L_\uparrow - \tau(1 - \varepsilon)L_\downarrow / \tau\varepsilon; \quad (8)$$

$$T_s = K_2 / \left(\ln \frac{K_1}{B(T_s) + 1} \right). \quad (9)$$

式 (7) ~ (9) 中: L_λ 为辐射亮度; ε 为比辐射率; $B(T_s)$ 为黑体辐射亮度; τ 为大气在热红外波段的透过

率; L_t 和 L_d 分别为大气向上辐射亮度和大气向下辐射亮度; T_s 为地表温度; $K_1=774.89 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \mu\text{m} \cdot \text{sr})^{-1}$; $K_2=1 \ 321.08 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \mu\text{m} \cdot \text{sr})^{-1}$; 其中, ε 、 L_d 和 L_t 均通过 NASA 网站 ([http:// atmcorr.gsfc.nasa.gov](http://atmcorr.gsfc.nasa.gov)) 进行查询所得。

5) 生态指数。将以上 4 个指标进行归一化处理, 采用主成分分析法将其合成, 得到最后的生态指标。公式如式 (10) ~ (11) 所示:

$$RESI_0 = 1 - PCI; \quad (10)$$

$$RESI = \frac{(RESI_0 - RESI_{0_MIN})}{(RESI_{0_MAX} - RESI_{0_MIN})} \quad (11)$$

式中: PCI 为第一主成分结果; $RESI_0$ 为初始生态值; $RESI_{0_MAX}$ 为 $RESI_0$ 最大值; $RESI_{0_MIN}$ 为 $RESI_0$ 最小值, 最终数值结果在 0~1 之间, 值越大说明生态状况越好, 反之越差。

3.3 土地利用碳排放估算

本文基于 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 清单法进行直接估算^[33], 通过碳排放系数进行土地利用碳排放总量的计算, 该方法用于估算非建设用地碳排放值。建设用地的计算方法使用间接法进行估算^[34], 最后将两种计算方法结合, 得到最终的碳排放总量结果, 各公式如式 (12) ~ (14) 所示:

$$E_{\text{非建设用地}} = \sum_{n=1}^5 (L_A \times \varepsilon_A); \quad (12)$$

$$E_{A \text{ 建设用地}} = GDP_{2,3} \times H \times K; \quad (13)$$

$$E = E_{\text{非建设用地}} + E_{A \text{ 建设用地}} \quad (14)$$

式 (12) ~ (14) 中: $E_{\text{非建设用地}}$ 为非建设用地的碳排放量; $E_{A \text{ 建设用地}}$ 为建设用地的碳排放量; L_A 为各土地利用类型面积; ε_A 为各土地利用类型碳排放系数; n 为土地利用类型, 这里取 5; $GDP_{2,3}$ 为各区县二三产业生产总值, 万元; H 为万元 GDP 能耗, 单位为 t 标准煤; K 为煤碳排放系数, 单位为 tC/t。本文根据文献 [35] 将耕地、水体、林地、草地、未利用地碳排放系数确定为 0.497, -0.253, -0.581, -0.021, -0.005 t/hm², 煤炭碳排放系数^[34] 为 0.747 6 tC/t。

4 结果与分析

4.1 土地利用类型景观分析

景观分析是体现不同类型景观格局在城市中的组合以及在城市中的表现形式, 与土地利用变化息息相关。本研究选取 30, 90, 150, 210 m 4 种尺度对土地利用分类数据分别进行最大斑块、边界密度以及形状指数的分析。

4.1.1 土地利用类型最大斑块指数

各年份不同土地类型的最大斑块指数结果如图 1 所示。

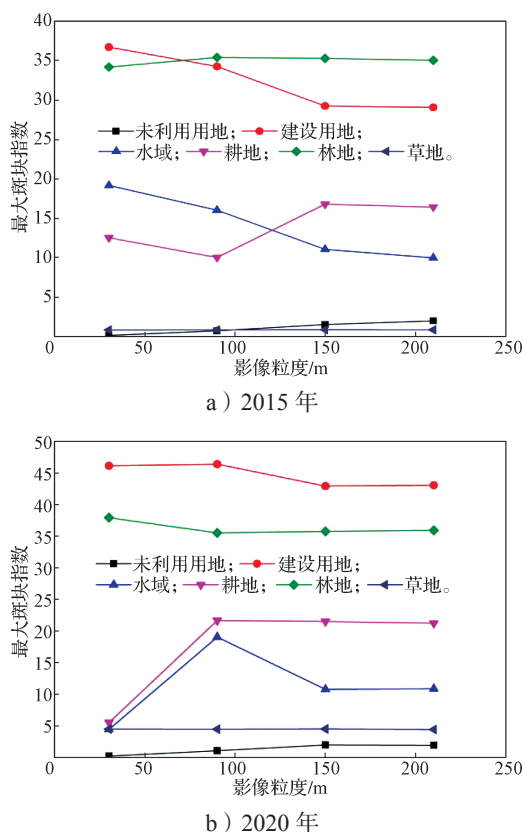


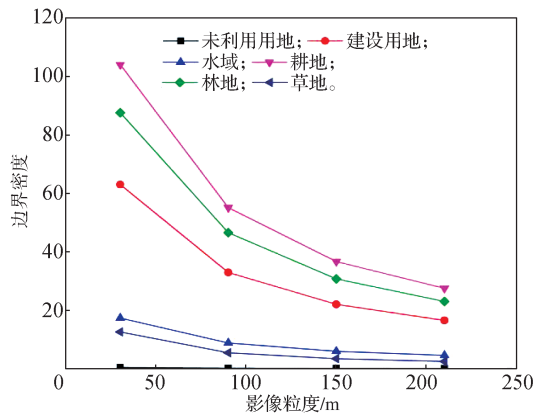
图 1 2015 与 2020 年成都市土地利用最大斑块指数图
Fig. 1 Maximum patch index map of land use in Chengdu City in 2015 and 2020

由图 1 可得, 2015 年建设用地随尺度增加而下降, 土地利用优势度以 30 m 为最佳, 2020 年先上升后下降, 优势度以 90 m 为最佳。2015 年水域的最大斑块指数变化随着尺度变粗逐渐下降, 2020 年则随着尺度变粗先上升后下降随后持平; 2015 年最大优势粒度是 30 m, 2020 年则是 90 m。2020 年耕地的最大斑块指数呈现出先上升后持平的趋势, 2015 年的变化趋势则是先下降后上升再下降, 优势度最好的是 150 m; 林地的变化趋势在 2015 年为先上升后下降, 在 2020 年为先下降后上升, 优势度最好的是 30 m。草地与未利用地优势度最好的是在 30 m 的尺度下, 在其余粒度下呈现出波动状态。综合分析所有土地利用类型最佳优势度数据, 本文选取 30 m 尺度作为土地利用类型分类的最优尺度。

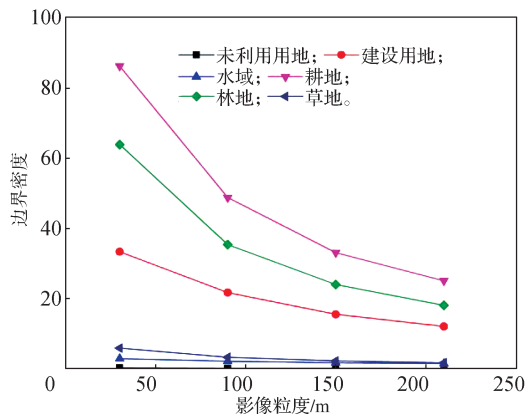
4.1.2 土地利用类型边界密度

成都市不同年份不同尺度的土地类型边界密度结果如图 2 所示。从图 2 中可以分析出, 不同年份下各土地利用类型的边界密度都是随尺度变大而逐渐减小。其中建设用地与耕地的敏感性最高, 建设用地

在 30 m 向 90 m 变化时, 2015 年变化幅度接近 30, 2020 年变化幅度超过 10; 耕地的变化则更为明显, 30 m 向 90 m 变化时变化幅度均超过 40, 后续变化幅度逐渐减小。综合各土地利用类型景观边界密度的分析结果, 得出 30 m 对于各土地利用类型景观均有较好的聚集作用, 与土地利用最大斑块指数结果相一致, 在 30 m 尺度下各类型斑块优势度明显。



a) 2015 年



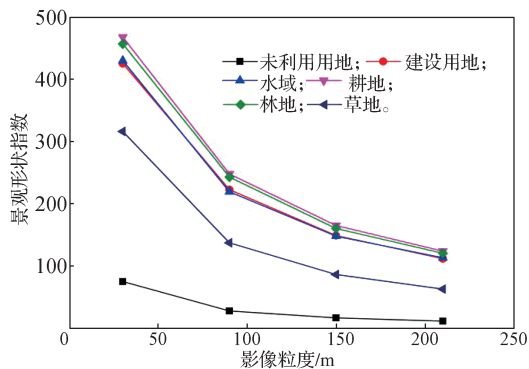
b) 2020 年

图2 2015与2020年成都市土地利用边界密度结果图

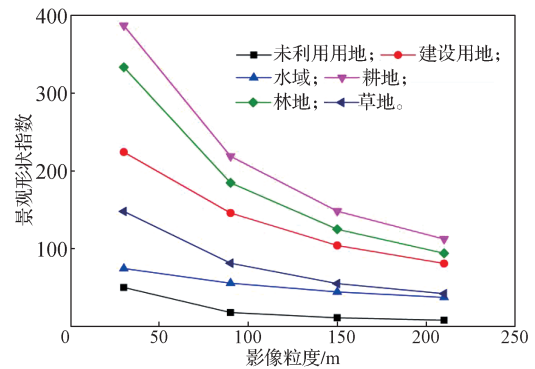
Fig. 2 Result map of land use boundary density in Chengdu city in 2015 and 2020

4.1.3 土地利用类型景观形状指数

成都市不同年份不同尺度的土地类型形状指数结果如图3所示。



a) 2015 年



b) 2020 年

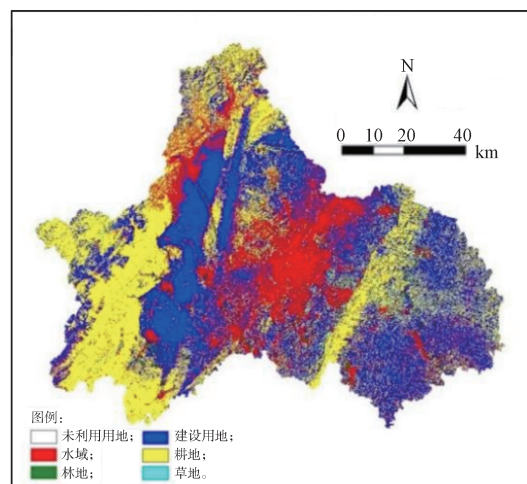
图3 2015与2020年成都市土地利用形状指数图

Fig. 3 Land use shape index map in Chengdu city in 2015 and 2020

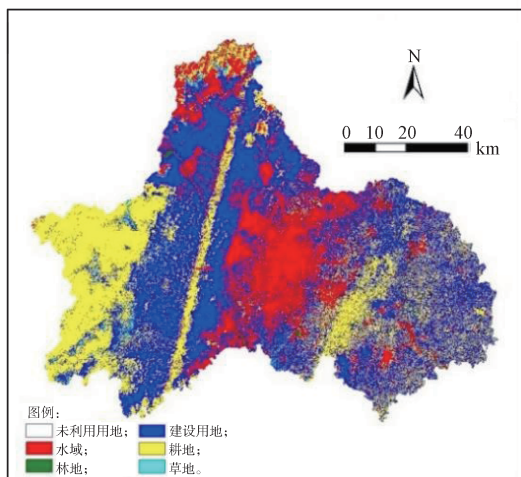
各土地利用类型的形状指数变化特征与土地利用类型边界密度相一致, 都是随着粒度变大逐渐减少, 以 30 m 向 90 m 变化最为明显, 且变化幅度最大的是建设用地与耕地, 说明这两类对粒度的变化最敏感, 变化最小的是草地与未利用地, 这两者对于粒度的变化不如其余类型敏感。

因此, 根据以上3个景观格局指数综合分析可得, 30 m 可作为各类别土地利用类型分类的最佳分类尺度, 分类方法选取随机森林监督分类方法, 分类结果如图4所示。

由图4中的土地利用分类结果可见, 城市建筑用地集中在城市中心, 林地分布于城市的四周, 耕地则介于两者之间。其中, 城市建筑用地增多, 扩张方向呈放东西向, 主要集中在城市中部地区; 林地分布较为集中, 特点明显, 林地面积略有减少, 其中以东南部分减少的较为明显; 成都市西部的耕地较为连续, 东部的耕地较为破碎, 耕地面积略有增长, 以东北区域增长为主; 水域面积两年相比变化不明显。



a) 2015 年



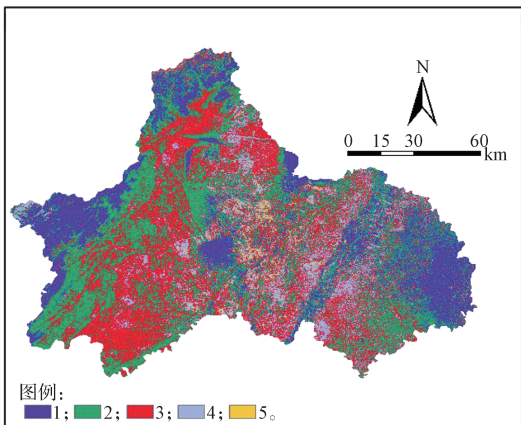
b) 2020 年

图 4 2015 与 2020 年成都市土地利用分类结果图

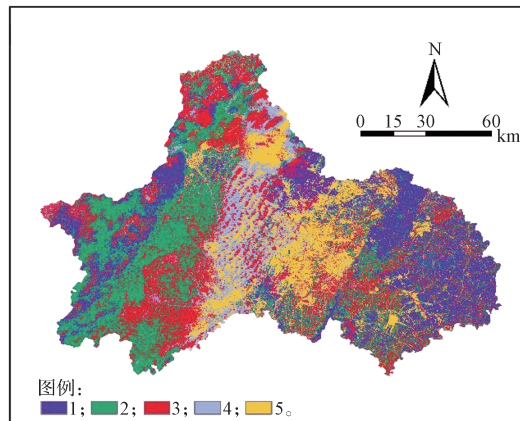
Fig. 4 Land use classification results in Chengdu city in 2015 and 2020

4.2 生态质量变化分析

为定量分析 2015—2020 年间研究区内生态质量的变化,将研究区 2015 年与 2020 年的 RSEI 反演结果平均划分为 5 个等级,结果如图 5 所示,数值由高到低依次代表优、良、中、较差、差。并对各级结果进行面积统计,统计结果如表 1 所示。结果表明,2020 年成都市生态质量为优的面积大幅上涨,增加量为 $1\,826.52\text{ km}^2$,等级为良的面积也增加了 36.32 km^2 。对比 2015 年与 2020 年各级面积所占比例,2020 年优等级的面积占比增长到 13.91%,较差等级的面积占比从 38.26% 缩减到 30.13%,这一结果表明,成都市在 2015—2020 年间生态质量总体得到提升。从图上可以得出,优等级区域变化主要集中于成都市中部地区。综合来看成都市 RSEI 结果在 2015 年与 2020 年优等级与较差等级部分变化显著,中部地区生态质量得以提升。



a) 2015 年



b) 2020 年

图 5 2015 与 2020 年成都市生态质量结果

Fig. 5 Ecological quality results in Chengdu city in 2015 and 2020

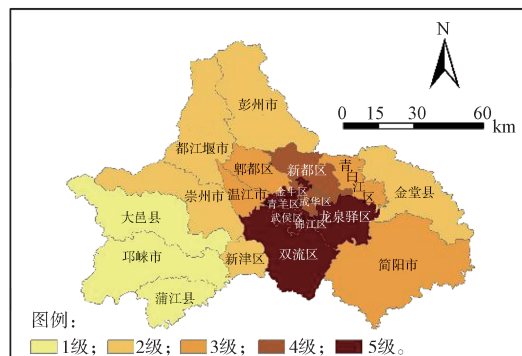
表 1 2015 年与 2020 年各级生态质量面积结果表

Table 1 Results of ecological quality area at all levels in 2015 and 2020

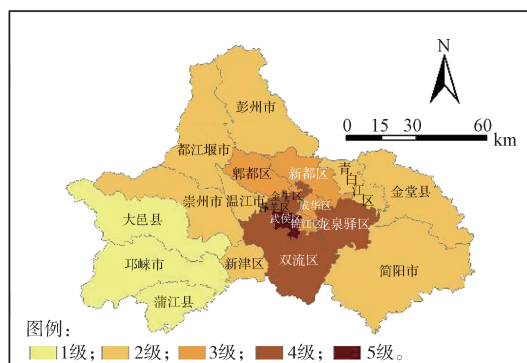
等级	面积 / km^2			占比 /%	
	2015	2020	变化	2015	2020
优	166.79	1 993.31	1 826.52	1.16	13.91
良	1 527.96	1 564.28	36.32	10.66	10.91
中	4 696.79	3 876.47	-820.32	32.77	27.04
较差	5 483.32	4 319.12	-1 164.20	38.26	30.13
差	2 458.39	2 580.01	121.62	17.15	18.00
总计	14 333.25	14 333.19	-0.06	100	100

4.3 区域碳排放空间格局分析

2015 年与 2020 年成都市碳排放总体计算结果(表 2)显示,成都市 5 a 内整体碳排放量有所上升,从 2015 年的 $3\,949.61 \times 10^4\text{ t}$,到 2020 年增加为 $6\,100.76 \times 10^4\text{ t}$,净增加量为 $2\,151.15 \times 10^4\text{ t}$,表明成都市近 5 a 内能源消耗有所增加。成都市整体碳排放量增加的主要原因,是在城市化发展过程中能源消耗量的增加。根据自然断点将成都市 20 个地级区县划分为 5 级,以各自年份碳排放量为依据划分,不进行两年数据归一化处理,其中数字越高,表明这一年的碳排放量越大,结果见图 6。



a) 2015 年



b) 2020 年

图6 2015与2020年成都市各县区碳排放总量图

Fig. 6 Total carbon emissions of all states and districts in Chengdu in 2015 and 2020

表2 成都市2015与2020年各县区碳排放结果表

Table 2 Carbon emission results of each state and district in Chengdu from 2015 to 2020

区域	2015年碳排放 总量/t	2020年碳排放 总量/t	碳排放变化量/t
双流区	3 504 675.64	5 617 956.44	2 113 280.80
大邑县	618 519.06	881 726.91	263 207.85
崇州市	817 601.96	1 262 150.32	444 548.36
彭州市	1 210 723.17	1 601 413.26	390 690.09
成华区	2 911 766.33	3 943 361.63	1 031 595.30
新津区	903 122.74	1 354 093.01	450 970.27
新都区	2 350 826.16	3 013 359.29	662 533.13
武侯区	3 340 170.40	10 594 666.96	7 254 496.56
温江区	1 575 886.82	2 151 650.31	575 763.49
简阳市	1 414 019.34	1 625 229.12	211 209.78
蒲江县	356 191.15	552 886.76	196 695.61
邛崃市	693 131.34	1 048 097.53	354 966.19
郫都区	1 700 695.77	4 311 109.31	2 610 413.54
都江堰市	1 058 782.52	1 471 139.02	412 356.50
金堂县	1 031 450.00	1 437 747.76	406 296.76
金牛区	3 676 711.71	4 752 680.52	1 075 968.81
锦江区	3 224 529.97	4 092 509.69	867 979.71
青白江区	1 366 325.45	1 927 800.80	561 475.35
青羊区	3 646 551.25	4 662 958.45	1 016 407.20
龙泉驿区	4 094 414.17	4 705 043.98	610 629.81
全市	39 496 095.95	61 007 581.05	21 511 485.12

图6的结果表明,2015年金牛、青羊、武侯、镇江、龙泉驿以及双流区域处于第5等级,新都、成华处于第4等级;2020年则仅剩武侯处于第5等级,金牛、青羊、龙泉驿以及双流处于第4等级。城市各区整体处于碳排放等级下降的发展模式,表明城市碳排放等级下降,各区、县的城市化进程有所减缓。2015年与2020年碳排放处于4、5级的地区均主要集中在城市中心区域,越向两边碳排放总量等级越低。总体来看成都市碳排放总量呈现中部多、四周少的空间格局,这与成都市土地利用现状有关,

城市集中发展在中心地区,四周以耕地、林地为主。因此越靠近中心碳排放量越大,城市化进程越明显。

4.4 区域碳排放与生态质量空间格局分析

为能更直观地将碳排放变化与生态质量变化结合,现将二者数据进行叠加分析。将2015与2020年生态质量变化情况分为3种:变差、不变以及变好。因碳排放均增加,因此使用自然断点法将增加量进行5个等级划分,数字越小等级越低,变化量越小。两者叠加后的结果如图7所示。由图可知,生态质量变差且碳排放增量少的低等级区、县为新都、青白江、金堂、简阳以及蒲江县;生态质量变好同时碳排放增量等级较高的区县共有9个,且多集中在城市中心;如武侯区,既是生态质量变好区,也是碳排放增量最大区。其余6个区、县为生态质量不变区域,除双流区碳排放增量为第4等级外,其余均处于低等级区域。一方面城市生态质量变化主要是由于城市化进程的不同程度所引起的,另一方面城市化进程也反映在城市碳排放数值的增加上。本文的碳排放计算过程中经济指标占据较大影响,景观格局占据较小影响,因此会出现在生态质量变好的同时碳排放量有所增加的情况。通过对成都市整体生态质量变化分析可得,城市整体经济发展迅速,因此碳排放总体处于增加状态,而生态质量也因公园城市和田园城市得以改善。

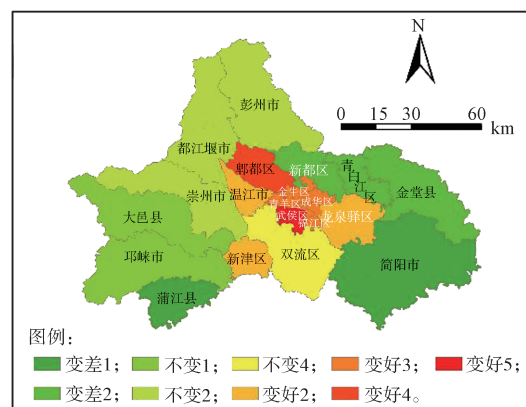


图7 2015—2020年成都市生态质量与碳排放空间格局叠加图

Fig. 7 Overlay map of the spatial pattern of ecological quality and carbon emissions in Chengdu from 2015 to 2020

从城市各区域中分析碳排放与生态质量变化关系可得,成都市北部以及中心县区生态质量得以提升,东南地区呈现下降状态,原因主要是城市化中心的转移导致生态质量变化。据《成都市城市总体设计(2011—2020)》规划,成都市东南地区将作为东部城市副中心,使区域内城市化进程加快,景观格局中建设用地有所增加,碳排放量增加大,生态质量有所下降。而中部地区则是因为政府这几年对城市生态的

关注,大力发展绿色公园城市,努力打造绿色生态的田园山水城市,通过对城区改造,改善生态环境,将生态与城市结合,使区域内生态质量有所改善,且该区域又是成都市的经济中心,经济发展迅速,因此区域内各区县碳排放量有所增加。出现区域内碳排放量增加以及生态环境变优的原因与成都市发展绿色生态的公园城市密不可分,城市发展虽然会消耗能源,使碳排放量增加,但通过改善城市的生态环境可以使城市发展的同时,生态环境也得以改善,从而降低能源带来的环境问题。由此可见,尽管成都市各区县依旧处于城市化高速发展中,但成都市整体生态质量变化趋势呈现出利好趋势。这可为成都市加快城市发展、构建生态和谐的公园城市提供有力支持。

5 结论与讨论

5.1 结论

本文首先对 2015 年与 2020 年土地利用数据进行景观格局分析,选取最优分类粒度;其次对遥感影像进行生态质量评价;最后对土地利用分类结果数据进行碳排放总量计算,得出 2015 年与 2020 年成都市各区、县碳排放数据的空间格局分布,并对两者空间格局进行叠加分析。具体结果如下:

1) 成都市 2015 年与 2020 年土地利用分类的最佳分类粒度为 30 m,通过景观分析可得,在 30 m 粒度下,各土地利用类型优势度明显,能够对后续城市发展研究进行更好地分类与分析。

2) 成都市 2015 年与 2020 年遥感生态指数表明城市整体生态质量逐渐增加,且生态质量变优区域集中于城市中心区域。从成都市土地利用数据中得出城市的发展方式是从中心向四周扩展的,城市建设用地多集中于城市中心区、县。成都市随着生态文明政策的实行,越来越注重城市的生态均衡发展,人们对居住的生态质量要求有所提高。结果显示成都市在 2015—2020 年发展过程中,城市中心地区的生态质量有了很大的提高。

3) 成都市碳排放总量呈现上升趋势。从城市碳排放空间格局来看,2015 年碳排放量大的地区集中于城市中心区、县,但到了 2020 年处于第 5 等级的区、县仅剩武侯区。从各区净碳排放量对比结果来看,全市除双流、武侯及郫都三区外,其余区、县碳排放总量增加量不大。结合生态质量与碳排放分布数据结果,得出随着城市化进程加快与城市生态质量的提高,碳排放总量增加,符合城市生态和谐发展。

4) 成都市整体处于生态与发展和谐共处状态,尽管城市发展快使碳排放量加大,但同时因为生态质

量的改善,使碳排放变化量大的区域并没有出现生态质量下滑的趋势,反而以生态质量变优为主。具体分析为:生态质量变优区域与碳排放增加量多的区域以市中心区、县为主,生态质量不变区域与碳排放增加量较少的区域以城市西北部区、县为主,生态质量变差同时碳排放增加量较少的区域以城市东北部区、县为主。

综上,本文运用景观格局最优尺度下的土地利用分类结果,对成都市进行生态质量评价,并探讨各区县碳排放的空间格局,结合生态质量与碳排放空间格局结果对成都市后续达到“双碳”目标提供思路。

5.2 讨论

本文首先对 2015 年与 2020 年的遥感影像进行景观格局分析,得出 30 m 粒度为最优分析尺度;并选取随机森林监督分类法进行分类,使用 OSM 数据对结果进行补充,最后得到 30 m 分辨率下的土地利用分类结果数据。其次进行生态质量计算,并主要从绿度、湿度、干度以及热度 4 个方面进行评价,评价结果以自然变化为主,所有结果均反映城市区域自然状态下的生态质量结果。本文根据两期分类数据进行生态质量评价分析,分析得出,在 2015—2020 年间成都市整体生态质量发生了较大改善,生态质量为优的区域面积增加,且生态质量变优的区域主要为城市中心区、县。碳排放数据通常可被作为城市发展的一个参考数据,碳排放量越大,城市发展越快。本文通过对成都市 20 个区、县进行碳排放计算,得出 2015—2020 年成都市整体碳排放量增加,城市处于高速城市化进程中,尤其是城市中心区、县。然而碳排放量不能用来评价城市化程度,仅能表示在两年内各区、县内碳排放程度,后续若想进一步分析成都市城市化的变化可以此作为参考进行更深入的分析。最后,本文结合生态与碳排放数据,将生态质量与碳排放结合起来,分析城市在发展中生态质量的变化状况。本研究发现,生态质量的变化并不会因为碳排放量的增加而降低,反而部分区域随着碳排放量的增加,生态质量也处于利好状态。产生以上结果的原因与城市发展政策有很大关系,其中公园城市的打造起着重要作用。因此,成都市在发展经济的同时可以对城市生态进行有效保护,甚至改善原有生态质量。本文对生态质量与碳排放量进行的研究可为后续公园城市打造以及市内生态质量的改善提供一定数据支撑与思路,对生态质量与碳排放的分析可以对城市生态建设效果进行说明,并对成都市实现“双碳”目标提供分析思路。

参考文献:

- [1] 李国栋, 张俊华, 陈 聪, 等. 气候变化背景下中国陆地生态系统碳储量及碳通量研究进展 [J]. 生态环境学报, 2013, 22(5): 873-878.
LI Guodong, ZHANG Junhua, CHEN Cong, et al. Research Progress on Carbon Storage and Flux in Different Terrestrial Ecosystem in China Under Global Climate Change[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, 22(5): 873-878.
- [2] WANG C, ZHAN J Y, ZHANG F, et al. Analysis of Urban Carbon Balance Based on Land Use Dynamics in the Beijing-Tianjin-Hebei Region, China[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 281: 125138.
- [3] QUÉRÉ C L, MORIARTY R, ANDREW R M, et al. Global Carbon Budget 2014[J]. Earth System Science Data, 2015, 7(1): 47-85.
- [4] DAILY G. Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems[J]. Corporate Environmental Strategy, 1997, 6(2): 220-221.
- [5] GREGORICH E G, ROCHETTE P, MCGUIRE S, et al. Soluble Organic Carbon and Carbon Dioxide Fluxes in Maize Fields Receiving Spring-Applied Manure[J]. Journal of Environmental Quality, 1998, 27(1): 209-214.
- [6] 李 浩. 把脉全球生态建设, 贡献中国力量: 《全球生态环境遥感监测 2017 年度报告》发布 [J]. 科技中国, 2017(12): 76-78.
LI Hao. Taking the Pulse of Global Ecological Construction and Contributing to China's Strength: Release of the 2017 Annual Report of Global Ecological Environment Remote Sensing Monitoring[J]. Scitech in China, 2017(12): 76-78.
- [7] 杨国清, 朱文锐, 文 雅, 等. 20 年来广东省土地利用碳排放强度与效率空间分异研究 [J]. 生态环境学报, 2019, 28(2): 332-340.
YANG Guoqing, ZHU Wenrui, WEN Ya, et al. Spatial Differentiation in the Intensity and Efficiency of Carbon Emission from Land Use in Guangdong Province in Past Two Decades[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2019, 28(2): 332-340.
- [8] 冯 杰, 张 胜, 王 涛. 中国省际土地利用碳排放及其影响因素分析 [J]. 统计与决策, 2019, 35(5): 141-145.
FENG Jie, ZHANG Sheng, WANG Tao. Analysis on Carbon Emissions from Inter-Provincial Land Use and Its Influencing Factors in China[J]. Statistics & Decision, 2019, 35(5): 141-145.
- [9] 陈芷君, 刘毅华, 林华荣. 广东省土地利用碳排放与经济增长之间的脱钩分析 [J]. 生态经济, 2018, 34(5): 26-32.
CHEN Zhijun, LIU Yihua, LIN Huarong. Decoupling Analysis of Land-Use Carbon Emissions and Economic Development in Guangdong Province[J]. Ecological Economy, 2018, 34(5): 26-32.
- [10] HANSEN J, KHARECHA P, SATO M, et al. Assessing "Dangerous Climate Change": Required Reduction of Carbon Emissions to Protect Young People, Future Generations and Nature[J]. PLo S One, 2013, 8(12): e81648.
- [11] FAN Q D, LIANG Z Z, LIANG L K, et al. Landscape Pattern Analysis Based on Optimal Grain Size in the Core of the Zhengzhou and Kaifeng Integration Area[J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2018, 27(3): 1229-1237.
- [12] ESTOQUE R C, MURAYAMA Y. Quantifying Landscape Pattern and Ecosystem Service Value Changes in Four Rapidly Urbanizing Hill Stations of Southeast Asia[J]. Landscape Ecology, 2016, 31(7): 1481-1507.
- [13] 梅昭容, 李云驹, 康 翔, 等. 基于移动窗口分析法的矿区景观格局时空演变研究 [J]. 国土资源遥感, 2019, 31(4): 60-68.
MEI Zhaorong, LI Yunju, KANG Xiang, et al. Temporal and Spatial Evolution in Landscape Pattern of Mining Site Area Based on Moving Window Method[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2019, 31(4): 60-68.
- [14] 王 甜, 卢付强, 李祖政. 基于遥感数据的常州市植被景观连通度研究 [J]. 森林与环境学报, 2021, 41(2): 188-197.
WANG Tian, LU Fuqiang, LI Zuzheng. Study on Vegetation Landscape Connectivity of Changzhou City Based on Remote Sensing Data[J]. Journal of Forest and Environment, 2021, 41(2): 188-197.
- [15] 李克强. 2019 年国务院政府工作报告: 在中共十三届全国人大二次会议上的报告 [R]. 北京: 人民出版社, 2019: 27.
LI Keqiang. 2019 State Council Government Work Report: Report at the Second Session of the 13th National People's Congress of the Communist Party of China[R]. Beijing: People's Publishing House, 2019: 27.
- [16] ANTWI E K, KRAWCZYNSKI R, WIEGLEB G. Detecting the Effect of Disturbance on Habitat Diversity and Land Cover Change in a Post-Mining Area Using GIS[J]. Landscape and Urban Planning, 2008, 87(1): 22-32.
- [17] 郭秋忠, 周学林, 严玉平, 等. 江西东江源区生态环境综合评价 [J]. 江西农业学报, 2011, 23(6): 126-128.
GUO Qiuzhong, ZHOU Xuelin, YAN Yuping, et al. Comprehensive Evaluation on Ecological Environment of Dongjiang River Source Area in Jiangxi Province[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2011, 23(6): 126-128.
- [18] WANG Z, CUI C, PENG S. How do Urbanization

- and Consumption Patterns Affect Carbon Emissions in China? A Decomposition Analysis[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 211: 1201–1208.
- [19] 杨亮洁, 杨永春. 石羊河流域土地利用变化对区域碳排放和碳吸收的影响[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2017, 53(6): 749–756, 763.
- YANG Liangjie, YANG Yongchun. Land Use/Cover Changes and It's Effect on Carbon Emission and Carbon Absorption in Shiyang River Basin[J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2017, 53(6): 749–756, 763.
- [20] 苏雅丽, 张艳芳. 陕西省土地利用变化的碳排放效益研究[J]. *水土保持学报*, 2011, 25(1): 152–156.
- SU Yali, ZHANG Yanfang. Study on Effects of Carbon Emission by Land Use Patterns of Shaanxi Province[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(1): 152–156.
- [21] XU S C, HE Z X, LONG R Y. Factors that Influence Carbon Emissions Due to Energy Consumption in China: Decomposition Analysis Using LMDI[J]. *Applied Energy*, 2014, 127: 182–193.
- [22] 秦 岩, 於 冉, 於忠祥, 等. 2000—2018 年长三角中心区土地利用碳排放强度的时空特征[J]. *河南农业大学学报*, 2021, 55(1): 132–140.
- QIN Yan, YU Ran, YU Zhongxiang, et al. Spatial and Temporal Characteristics of Land Use Carbon Emission Intensity in the Central Area of Yangtze River Delta from 2000 to 2018[J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2021, 55(1): 132–140.
- [23] 赵荣钦, 张 帅, 黄贤金, 等. 中原经济区县域碳排放空间分异及碳平衡分区[J]. *地理学报*, 2014, 69(10): 1425–1437.
- ZHAO Rongqin, ZHANG Shuai, HUANG Xianjin, et al. Spatial Variation of Carbon Budget and Carbon Balance Zoning of Central Plains Economic Region at County-Level[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(10): 1425–1437.
- [24] 蔡冬梅. 黄河三角洲土地利用/覆被变化与生态系统健康评价研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.
- CAI Dongmei. Study On Land Use/Cover Change and Ecosystem Health Assessment in the Yellow River Delta[D]. Nanjing: Southeast University, 2016.
- [25] LI Y, LIU M L, LIU X N, et al. Characterising Three Decades of Evolution of Forest Spatial Pattern in a Major Coal-Energy Province in Northern China Using Annual Landsat Time Series[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2021, 95: 102254.
- [26] CHANG C T, SONG C G, LEE L, et al. Influence of Landscape Mosaic Structure on Nitrate and Phosphate Discharges: An Island-Wide Assessment in Subtropical Mountainous[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2021, 207: 104017.
- [27] SHEN S G, YUE P, FAN C J. Quantitative Assessment of Land Use Dynamic Variation Using Remote Sensing Data and Landscape Pattern in the Yangtze River Delta, China[J]. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 2019, 23: 111–119.
- [28] 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.
- XU Hanqiu. A Remote Sensing Urban Ecological Index and Its Application[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(24): 7853–7862.
- [29] GOWARD S N, XUE Y K, 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.
- [30] JIMENEZ-MUNOZ J C, CRISTOBAL J, SOBRINO J A, et al. Revision of the Single-Channel Algorithm for Land Surface Temperature Retrieval from Landsat Thermal-Infrared Data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(1): 339–349.
- [31] RIKIMARU A, ROY P, MIYATAKE S. Tropical Forest Cover Density Mapping[J]. *Tropical Ecology*, 2002, 43: 39–47.
- [32] CRIST E P. A TM Tasseled Cap Equivalent Transformation for Reflectance Factor Data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1985, 17(3): 301–306.
- [33] YANG X, MA C B, ZHANG A L. Decomposition of Net CO₂ Emission in the Wuhan Metropolitan Area of Central China[J]. *Sustainability*, 2016, 8(8): 784.
- [34] 王 涛, 冯 杰. 陕西省土地利用碳排放演变与影响因素分析研究[J]. *环境科学与管理*, 2016, 41(12): 25–29.
- WANG Tao, FENG Jie. Analysis of Influential Factors and Evolution of Land Use Carbon Emission in Shanxi Province[J]. *Environmental Science and Management*, 2016, 41(12): 25–29.
- [35] 石洪昕. 四川省广元市土地利用变化的碳排放效应研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012.
- SHI Hongxin. Study on Carbon Emission Effect of Land Use Change in Guangyuan City, Sichuan Province[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2012.

(责任编辑: 申 剑)