



地球物理学进展
Progress in Geophysics
ISSN 1004-2903, CN 11-2982/P

《地球物理学进展》网络首发论文

题目: 基于遥感和 POI 数据的重庆市主城区城市生态环境格局研究
作者: 任彦霓, 周廷刚, 李洪忠, 谢舒蕾, 尹振南
收稿日期: 2020-12-01
网络首发日期: 2021-02-10
引用格式: 任彦霓, 周廷刚, 李洪忠, 谢舒蕾, 尹振南. 基于遥感和 POI 数据的重庆市主城区城市生态环境格局研究. 地球物理学进展.
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2982.P.20210209.1729.032.html>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式 (包括网络呈现版式) 排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊 (光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊 (网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊 (网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物 (ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

基于遥感和 POI 数据的重庆市主城区城市生态环境格局研究

任彦霓^{1,2}, 周廷刚^{1✉}, 李洪忠², 谢舒蕾¹, 尹振南^{1,2}

(1.三峡库区生态环境教育部重点实验室, 西南大学地理科学学院, 重庆 400715;

2.中国科学院深圳先进技术研究院, 广东 深圳 518055)

*通信作者 周廷刚, 男, 1971 年生, 教授, 主要从事遥感与地理信息系统应用研究。E-mail: zhouzg@163.com

摘要 城市的急剧扩张加速了人类活动对生态环境的影响, 引发地表植被破坏、水土流失、热岛效应等各种生态问题。摸清城市建设对生态环境的影响方式, 是维护城市生态安全, 保证其可持续发展的重要条件。本文以重庆市主城区为研究区, 将 Landsat 遥感影像、土地利用数据、城市功能设施 POI 等多源数据融合, 首先基于 RSEI 模型实现重庆市主城区 2000—2017 年生态环境质量、土地利用变化的监测评价, 并分析二者间联系; 其次基于核密度估计法探索研究区功能设施分布现状, 并在地理探测器支持下, 精细化探索城市功能设施聚集情况对生态环境评价指标的影响。结果表明: ①20 年来, 重庆市主城区生态环境质量处于优良等级面积占比分别减少 6.04%、3.19%, 而中、较差、差等级占比分别增加 6.08%、2.98%、0.17%, 变差区域与城市扩张区域相符, 城市建设对生态环境破坏效应明显。②城市功能分布现状呈“多中心、多组团”模式: 渝中、观音桥等中心组团为商务、行政、居住区; 北碚、沙坪坝组团为科教文化区; 观音桥-人和、两路、西永、界石等组团为交通、仓储物流区; 大渡口、唐家沱、西彭、茶园、鱼嘴组团为主要工业区; 自然、人文景点及城市公园为主要绿地区。③生态环境质量评价指标对各类功能设施聚集情况响应不一, NDVI 和 LST 较敏感, NDBSI 和 Wet 不敏感; 工企、交通设施聚集区 NDVI 低, LST 高, 不利影响显著; 绿地设施聚集区 NDVI 高、LST 低, 有利影响明显; 商务、行政、居住设施聚集区 NDVI、LST 处于中间, 影响相对小。

关键词 生态环境质量; 遥感生态指数; 城市功能结构; 兴趣点 (POI); 地理探测器

Research on the urban ecological environment pattern in the main urban area of Chongqing based on remote sensing and POI data

REN Yanni^{1,2}, ZHOU Tinggang^{1✉}, LI Hongzhong², XIE Shulei¹, YIN Zhennan^{1,2}

(1.Key laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region (Ministry of Education), School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715; 2.Shenzhen Institute of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen Guangdong 518055)

Abstract The rapid expansion of cities has accelerated the impact of human activities on the ecological environment, causing various ecological problems such as destruction of surface vegetation, soil erosion, and heat island effect. Understanding how urban construction affects the ecological environment is an important condition for maintaining urban ecological safety and ensuring its sustainable development. Taking the main urban area of Chongqing as the research area, the author combined Landsat remote sensing images, land use data, point of interest (POI) and other multi-source data as research data. Firstly, based on the Remote Sensing Ecological Index (RSEI) model to monitor the ecological environment quality in the main urban area of Chongqing from 1998 to 2017. Then, based on the nuclear density estimation method, the authors explored the current distribution of urban functional facilities and then explored the impact of the aggregation of these facilities on the ecological environment with the support of Geodetector. The results show that: ① In the past 20 years, the proportion of areas in very good and good grades of eco-environmental quality have decreased by 6.04% and 3.19%, while the medium, poor, and very poor grades have increased by 6.08%, 2.98% and 0.17%. The deteriorating area is consistent with the

收稿日期: 2020-12-01

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No.2016YFC0500201-07); 国务院三峡办三峡后续工作库区生态与生物多样性保护专项 (No.500000201BB5200002);

作者简介: 任彦霓, 女, 1996 年生, 硕士研究生, 研究方向为遥感与地理信息系统应用。E-mail: rynnneon@163.com

网络首发时间: 2021-02-10 10:32:23 网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2982.P.20210209.1729.032.html>

urban expansion area, indicating that urban construction has caused significant damage to the ecological environment. ②The current distribution of urban functions presents a "multi-center, multi-group" pattern: Yuzhong, Guanyinqiao and other center groups are the commercial, administrative and residential areas; Beibei and Shapingba groups are educational and cultural centers; Guanyinqiao-Renhe, Lianglu, Xiyong and Jieshi are transportation and logistics area; Dadukou, Tangjiatuo, Xipeng, Chayuan, Yuzui are the main industrial areas; Natural, cultural attractions and urban parks are the main green areas. ③Remote sensing indicators have different responses to changes in the density of urban functional facilities. Among them, NDVI and LST are more sensitive, but NDBSI and Wet are not sensitive; The NDVI of industrial enterprises and transportation facilities clusters is low, LST is high, and the adverse effects are significant. Greenbelt facilities gathering areas have high NDVI and low LST, which has obvious beneficial effects. NDVI and LST are in the middle of the commercial, administrative, and residential facilities gathering area, and the impact is relatively small.

Key words Eco-environment quality ;RSEI ; Urban functional structure ;POI ;Geo Detector

改革开放以来,我国城市化势头迅猛,最直观的表现即城市地域的急剧扩张(马廷,2019),城市开发过程中对生态空间的不断挤占(夏函等,2020),引发了地表植被破坏、水土流失、热岛效应(欧阳晓和朱翔,2020)、土地资源浪费等一系列城市生态问题(汪思彤等,2011;马丽和金凤君,2011)。因此,探索城市化进程中生态环境变化,揭示城市建成环境对生态环境格局空间分异的影响,对维护城市生态安全、保证城市可持续发展具有重要意义。

国家生态环境部在《生态环境状况评价技术规范》中推出生态环境状况指数(Ecological Index, EI),融合生物丰度、植被覆盖等指标来评价省域、县域生态环境状况,存在部分指标数据人工获取困难、难以空间化等问题(徐涵秋,2013)。随着遥感技术的发展,遥感数据范围广、多时相、实时性等优势得到广泛关注,基于遥感影像能够直接提取反映植被(韩贵锋等,2009)、水质(Basnyat P et al, 2000),大气污染(李先华等,2008)、地表温度(Xu Hanqiu et al, 2009)等生态环境相关的遥感指数,对大范围、长时序的生态环境质量评价具有重要价值。如徐涵秋等(徐涵秋等,2013)提出的遥感生态指数(Remote Sensing Based Ecological, RSEI),综合遥感影像反演得到的植被、湿度、土壤、地表温度等指标,实现了长汀县河田盆地区域生态环境质量评价。但由于不同研究区存在气候条件、地表环境的差异性,因而出现了基于干旱区、草原等改进的生态环境质量评价模型(王杰等,2020;宋美杰等,2019)。对于城市区域,不透水面的扩张不断挤占生态空间,对此,徐涵秋在RSEI模型中引入建筑-裸土指数(徐涵秋等,2013)来考虑城市建筑对生态的影响,但此模型着重于区域整体,而实际上由于相似功能的城市要素易在空间上产生聚集(邢诒等,2002;卢伟等,2009),导致城市不同区域下垫面组合多样,空间结构十分复杂,全区域的建筑-裸土指数难以反映城市内部不同功能建筑组合产生的局部生态环境差异。

近年来,具有空间信息和属性信息,能够在微观尺度上反映城市功能设施分布情况的城市兴趣点(POI, Point of Interest)数据得到广泛关注。利用POI数据,可以实现城市系统特征要素提取(赵卫锋等,2011)、建成区边界识别(许泽宁等,2016)、城市功能分区(段亚明等,2018;薛冰等,2018)等建成区环境的精细化探索。综合城市大数据与遥感数据的城市生态问题研究逐渐成为趋势:如韩善锐等(韩善锐等,2017)将城市POI数据与Landsat8数据相结合,证明POI密度与地表温度的正相关性,并定量分析了人类活动及城市生态基础设施对城市热场的重要性;栾夏丽等(栾夏丽等,2018)用城市POI密度表征城市人类活动特征,在多尺度对比中证明了生态基础设施的降温效应以及建筑容积、POI密度与地表温度的正相关关系。但是,大部分研究关注于POI与城市热场之间的关系,对POI与其他生态环境相关遥感指标的关系研究仍较少,从而难以全面而细化地分析复杂建成环境对生态环境的影响方式。因此,精细尺度下城市POI聚集差异对生态遥感指标的影响及其引起的生态环境质量空间分异问题仍待进一步研究分析。

重庆市是成渝城市群的重要增长极,经济发展水平较高,人口密集,产业集中,城市功能较为完善;由于其地处生态环境脆弱敏感的三峡库区(毛汉英等,2002),地形条件复杂,境内区域受大山大水双重分割,因此其城区建设与生态环境的协调发展具有重要意义。鉴于此,本文以重庆市主城区为例,将遥感数据与城市功能设施POI数据相结合,对研究区生态环境质量变化及其空间分异进行精

细化探究。首先选取云量低、成像质量好的 1998、2008、2017 年三期 Landsat TM 和 OLI 影像作为 2000、2010、2017 年每 10 年一期的研究数据，基于 RSEI 模型，反演重庆主城近 20 年来的生态环境质量时空变化；同时将同期土地利用数据空间化，分析生态环境质量变化趋势与城市扩张之间的联系；然后基于城市功能设施 POI，利用核密度估计法分析各功能设施空间聚集情况，探索城市功能分区现状；并利用地理探测器，探究 POI 聚集密度变化对生态环境质量相关遥感指标的影响；最后将 POI 密度值融入 RSEI 评价模型中，更精细地揭示城市不同功能设施聚集差异引起的生态环境质量的空间分异，以期为探索城市复杂建成环境对生态环境质量的影响方式提供借鉴和参考。

1 研究区概况与数据处理

1.1 研究区概况

重庆市主城区是重庆市主城区的重要组成部分，位于 106°43′ -106°60′ E，29°45′ -29°63′ N（图 1），主要包括渝中区、江北区、南岸区、九龙坡区、沙坪坝区、大渡口区、北碚区、渝北区、巴南区，是成渝城市群经济最活跃区域之一，根据《重庆统计年鉴》，2019 年主城区常住人口 875 万人，GDP 达到 9334.22 亿元。其自然环境十分复杂，境内地势以低山丘陵为主，海拔高度为 176~1376 m，南北向有缙云山、中梁山、铜锣山、明月山平行相间排列，东西向有长江、嘉陵江横贯其中，城市格局受大山大水双重分割，主要形成中梁山、铜锣山、长江、嘉陵江中间的中部片区，嘉陵江、长江以北的北部片区，长江以南、以东及铜锣山以西的南部片区，缙云山、中梁山之间的西部片区以及铜锣山和明月山之间的东部片区，每个片区形成若干组团。

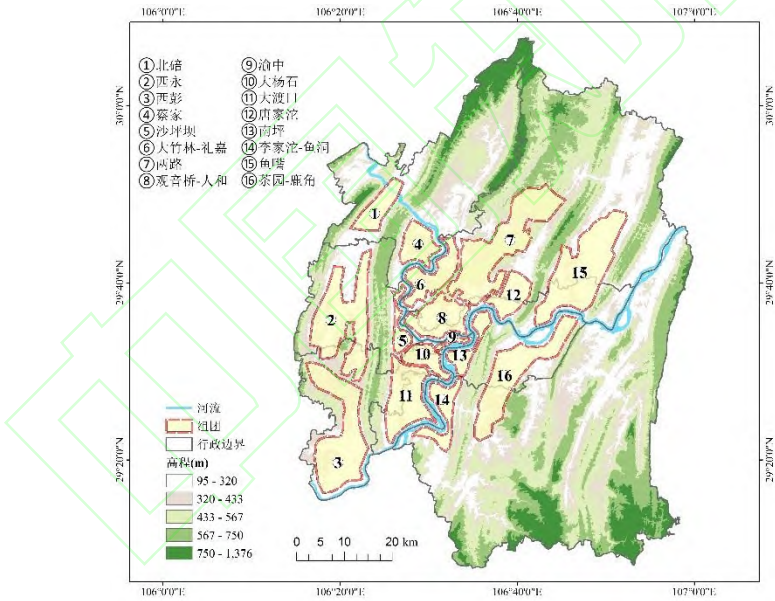


图 1 重庆市主城区概况示意图（根据《重庆市城乡总体规划（2007-2020 年）》自绘）
Fig.1 Overview of main urban area of Chongqing

1.2 数据来源与预处理

本文所用数据如表 1 所示，Landsat 遥感影像数据是基于 GEE（Google Earth Engine）平台下载，土地利用数据基于 GlobeLand30 平台获取；高程数据基于地理空间数据云获取；城市功能设施 POI 数据利用 Python 通过高德地图 API 接口获取，为满足本文分析需要，对获取的 POI 数据进行清洗、去重、坐标转换等处理，并参考《国民经济行业分类（GB/T 4754—2011）》对 POI 数据进行重分类，分类结果见表 2。

表1 数据来源与预处理
Table.1 Data source and preprocessing

数据类型	数据来源	时间	空间分辨率	数据预处理
Landsat 数据	Google Earth Engine	1998、2008、2017 年 4—6 月	30 m	辐射定标、大气校正、几何校正等
土地利用数据	GlobeLand30 (http://www.globeland30.org/)	2000、2010、2017 年	30 m	重分类、可视化
高程数据	地理空间数据云	/	30 m	可视化
POI 数据	高德地图 API 接口	2019 年 4 月	/	清洗、重分类

表2 POI重分类结果及数量特征
Table.2 POI reclassification results and quantitative characteristics

类别	包含 POI 内容	POI 个数	占比
行政公服	行政办公、文化体育、教育科研、卫生医疗等设施	40739	19.54%
景点绿地	公园绿地、防护绿地、广场等公共开放空间设施	1606	0.77%
商业商务	金融保险、住宿餐饮、商铺商场、超市市场、娱乐康体、加油加气站、广告公司、营业网点等设施	89979	43.15%
居住生活	住宅及生活服务、公用设施等	46958	22.52%
工厂企业	公司企业、产业园区、冶金工厂等生产车间、库房及其附属设施	12255	5.88%
道路交通	交通枢纽、站点、道路附属设施等	16996	8.15%
合计	/	208533	100%

2 研究方法

2.1 遥感生态指数模型

(1) 模型指标提取

遥感生态指数(Remote Sensing Based Ecological Index, RSEI)模型(徐涵秋等, 2013)基于遥感信息, 综合考虑植被生长状态、土壤湿度、土壤干化程度、建筑用地状况、地表温度, 选取归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)作为绿度指标, 缨帽变换的湿度分量(WET)作为湿度指标, 地表温度(Land Surface Temperature, LST)表示热度指标, 裸土指数(Soil Index, SI)和建筑指数(Index-based Built-up Index, IBI)的合成结果表示干度指标(Normalized difference built-up and soil Index, NDBSI)。RSEI 函数表示如下:

$$RSEI = f(Greenness, Wetness, Heat, Dryness) \tag{1}$$

式中:Greenness 为绿度; Wetness 为湿度; Heat 为热度; Dryness 为干度, 遥感定义为:

$$RSEI = f(VI, Wet, LST, NDBSI) \tag{2}$$

式中, VI、Wet、LST、NDBSI 分别为植被指数、湿度分量、地表温度、建筑-裸土指数, 其中

①绿度指标: 归一化植被指数(NDVI)涵盖植物生物量、叶面积指数、植被盖度等信息, 应用十分广泛(Goward S N et al, 2002), 其计算公式为:

$$NDVI = (\rho_{NIR} - \rho_{Red}) / (\rho_{NIR} + \rho_{Red}) \tag{3}$$

式中, NDVI 取值范围为[-1,1], ρ_{NIR} 为近红外波段的反射值, ρ_{Red} 为红光波段的反射值。

②湿度指标(Wet): 遥感缨帽变换得到的湿度分量能够反映地表植被、土壤湿度(Crist E P, 1985), 由于在 TM 和 OLI 遥感影像中波段有所差异, 计算公式为(Huang C et al, 1998):

TM 数据:

$$Wet = 0.03151\rho_{Blue} + 0.2021\rho_{Green} + 0.3102\rho_{Red} + 0.1594\rho_{NIR} - 0.6806\rho_{SWIR1} - 0.6109\rho_{SWIR2} \quad (4)$$

OLI 数据:

$$Wet = 0.1511\rho_{Blue} + 0.1973\rho_{Green} + 0.3283\rho_{Red} + 0.3407\rho_{NIR} - 0.7117\rho_{SWIR1} - 0.4559\rho_{SWIR2} \quad (5)$$

式中 ρ_{Blue} 、 ρ_{Green} 、 ρ_{Red} 、 ρ_{NIR} 、 ρ_{SWIR1} 、 ρ_{SWIR2} 表示蓝波段、绿波段、红波段、近红外波段、短波红外 1、2 波段。

③热度指标 (LST): 用地表温度代表, 本文采用大气校正法, 依据辐射传输方程对地表温度进行反演, 公式为 (LI Hua et al, 2007):

$$L_{\lambda} = [\varepsilon P(T_s) + (1 - \varepsilon)L_{\downarrow}] \tau + L \quad (6)$$

$$P(T_s) = [L_{\lambda} - L_{\uparrow} - \tau(1 - \varepsilon)L_{\downarrow}] / \tau\varepsilon \quad (7)$$

$$T_s = K_2 / \ln \left[\frac{K_1}{P(T_s)} + 1 \right] \quad (8)$$

$$LST = T_s - 273 \quad (9)$$

式中, L_{λ} 代表热红外辐射亮度; ε 代表地表辐射率; T_s 为亮度温度, 单位为 K; $L_{\uparrow}$ 代表大气向上辐射亮度、 $L_{\downarrow}$ 代表向下辐射亮度。 $P(T_s)$ 是黑体热辐射亮度, τ 为热红外波段中大气透过率, LST 表示地表温度, 单位为 $^{\circ}\text{C}$, K_1 和 K_2 为定标系数 (可在影像元数据中获取)。

④干度指标: 城市建筑与裸土均能造成地表“干化”, 因此选取建筑指数 (IBI) 和裸土指数 (SI) 结合生成干度指标 (徐涵秋等, 2013):

$$NDBSI = (IBI + SI) / 2 \quad (10)$$

$$IBI = \frac{2\rho_{SWIR1}(\rho_{SWIR1} + \rho_{NIR})^{-1} - \rho_{NIR}(\rho_{SWIR1} + \rho_{NIR})^{-1} - \rho_{Green}(\rho_{SWIR1} + \rho_{Green})^{-1}}{2\rho_{SWIR1}(\rho_{SWIR1} + \rho_{NIR})^{-1} + \rho_{NIR}(\rho_{SWIR1} + \rho_{NIR})^{-1} - \rho_{Green}(\rho_{SWIR1} + \rho_{Green})^{-1}} \quad (11)$$

$$SI = \frac{[(\rho_{SWIR1} + \rho_{Red}) - (\rho_{NIR} + \rho_{Blue})]}{[(\rho_{SWIR1} + \rho_{Red}) + (\rho_{NIR} + \rho_{Blue})]} \quad (12)$$

(2) 综合指标构建

多元统计中常见的主成分分析方法 (Principal Component Analysis, PCA) (Maldonado F D et al, 2002), 可以通过线性变换的方式, 将多个变量转换为少数重要变量, 剔除冗余信息, 得到集中了原始指标中大部分特征的综合指标。因此, 利用主成分分析对各遥感指标进行集成, 由于各指标度量单位不统一, 在进行 PCA 计算前需进行正规化处理 (赵卫锋等, 2011):

$$NI_i = (I_i - I_{min}) / (I_{max} - I_{min}) \quad (13)$$

式中: NI_i 为正规化后的指标值, 取值范围为 [0, 1]; I_i 为象元 i 处的指标值; I_{max} 、 I_{min} 分别为指标最大值、最小值。

利用正规化后的指标进行主成分计算, 并对计算结果同样进行正规化处理:

$$RSEI_0 = 1 - \{PC1[f(Wet, NDVI, LST, NDBSI)]\} \quad (14)$$

$$RSEI = (RSEI_0 - RSEI_{0_{min}}) / (RSEI_{0_{max}} - RSEI_{0_{min}}) \quad (15)$$

式中, PCA 为主成分分析, $RSEI_0$ 为初始生态指数, $RSEI$ 为所建遥感生态指数, 取值为 [0, 1], 值越大, 生态环境质量状况越好; 反之越差。

2.2 核密度估计法

利用城市 POI 数据进行核密度分析, 获取 POI 影响扩散, 可以实现对城市功能空间分布的刻

画。核密度估计 (Kernel Density Estimation, KDE) 是一种计算空间要素在其周围邻域中密度的方法, 基于空间自相关原理, 认为某一空间内事件分布的密度可以通过其周围事件的密度来估计 (禹文豪等, 2015)。使用核函数, 计算某一 POI 要素在规定带宽内对周围的贡献值, 并且将各个要素拟合为光滑曲面。本文将处理后的 6 个类别 POI 数据以 1000m 搜索半径分别进行核密度估计, 模型为 (卢敏等, 2017):

$$f(x) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{h^2} k \frac{x - x_i}{h} \quad (16)$$

式中, $f(x)$ 是 x 处要素的密度估计值, h 为窗口宽度或带宽, $x - x_i$ 为第 i 个要素与被估计要素 x 的距离, $k(\cdot)$ 为核的权重函数。

2.3 地理探测器模型

地理探测器 (GeoDetector) 能够探测某种因子是否有效影响某类指标的空间分布, 包括分异及因子探测器、交互作用探测器、风险探测器、生态探测器 4 种类型 (王劲峰等, 2017), 本文尝试将分异及因子探测器、风险探测器引入城市生态质量评价并探究各遥感指标的影响机制。

(1) 分异及因子探测器

用于探测遥感指数的空间分异性, 即某一因子 X 对 RSEI 模型中各遥感指标 Y 的空间分异的影响程度, 用 q 值度量, q 值越大的 X 对 Y 的空间分异影响越明显:

$$q = 1 - \frac{1}{N \sigma^2} \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2 = 1 - \frac{SSW}{SST} \quad (17)$$

式中: $h=1, \dots, L$ 是生态指数值影响因子的分层, N_h 、 N 分别为 h 层和全区的单元数; σ_h^2 和 σ^2 分别为层 h 和全区的 Y 值方差。SSW、SST 分别为层内方差之和、全区总方差。若分层由自变量 X 生成, 则 q 值越大表示因子 X 对 Y 的解释力越强, 反之越弱。

(2) 风险探测器

用于判断两个子区域间各遥感指数均值是否有显著差异, 即探测某因子在不同等级范围内对遥感指标 Y 均值的影响, 用 t 统计量检验:

$$t_{\bar{y}_{h=1} - \bar{y}_{h=2}} = \frac{\bar{y}_{h=1} - \bar{y}_{h=2}}{\left[\frac{\text{var}(\bar{y}_{h=1})}{n_{h=1}} + \frac{\text{var}(\bar{y}_{h=2})}{n_{h=2}} \right]^{1/2}} \quad (18)$$

式中, $\bar{y}_h$ 表示在某一等级 h 内的遥感指标 (Wet, NDVI, NDBSI, LST) 的均值, n_h 为等级 h 内的样本数, var 为方差, 统计量 t 近似服从 Student's t 分布, 其自由度的计算公式如下:

$$df = \frac{\frac{\text{var}(\bar{y}_{h=1})}{n_{h=1}} + \frac{\text{var}(\bar{y}_{h=2})}{n_{h=2}}}{\left[\frac{1}{n_{h=1} - 1} \left[\frac{\text{var}(\bar{y}_{h=1})}{n_{h=1}} \right]^2 + \left[\frac{1}{n_{h=2} - 1} \left[\frac{\text{var}(\bar{y}_{h=2})}{n_{h=2}} \right]^2 \right]} \quad (19)$$

零假设 $H_0: \bar{y}_{h=1} = \bar{y}_{h=2}$, 若在置信水平 α 下拒绝 H_0 , 则说明两个分区的属性均值具有显著差异。

3 结果与分析

3.1 土地利用结构时空变化分析

对重庆市主城区近 20 年土地利用变化情况进行统计 (表 3), 其空间分布如图 2 所示。林地主要分布在缙云山、中梁山、铜锣山、明月山地带以及主城区北部、南部地区, 20 年来面积变化不明显; 耕地主要分布在“四山”相间排列形成的平行谷地中, 呈现逐年递减趋势; 不透水面主要分布在中梁山、铜锣山之间的中部片区, 近 20 年来面积不断增加, 向西已突破中梁山阻拦向西永组团拓展, 向北朝

两路方向扩张，向东部朝鱼嘴、茶园组团延伸，而南部扩张已达到边界。草地、水体、裸地面积近 20 年来变化不大。综合分析可知：2000—2017 年，重庆市主城区耕地、不透水面面积变化显著，耕地面积逐年减少，不透水面逐年增加；林地、水体面积有所减少，草地、裸地面积小幅增加。城区扩张呈现主西、北，次东、南态势：西部西永、西彭组团，北部蔡家、大竹林-礼嘉、观音桥-人和、两路、唐家沱组团，东部茶园-鹿角、鱼嘴组团，南部南坪、李家沱-鱼洞组团为城市主要拓展区。

表3 2000—2017 年重庆市主城区土地利用变化情况
Table.3 Changes in land use in the main urban area of Chongqing from 2000 to 2017

土地利用 类型	2000		2010		2017		2000-2010	2010-2017
	面积(km ²)	比例(%)	面积(km ²)	比例(%)	面积(km ²)	比例(%)	变化(km ²)	变化(km ²)
林地	2658.746	48.65%	2823.462	51.59%	2798.504	51.19%	164.715	-24.958
耕地	2288.791	41.88%	1748.066	31.94%	1400.323	25.62%	-540.724	-347.744
不透水面	229.862	4.21%	548.966	10.03%	882.338	16.14%	319.104	333.373
草地	168.310	3.08%	166.051	3.03%	229.952	4.21%	-2.259	63.901
水体	111.747	2.04%	178.062	3.25%	146.381	2.68%	66.315	-31.680
裸地	7.157	0.13%	8.006	0.15%	9.182	0.17%	0.850	1.175

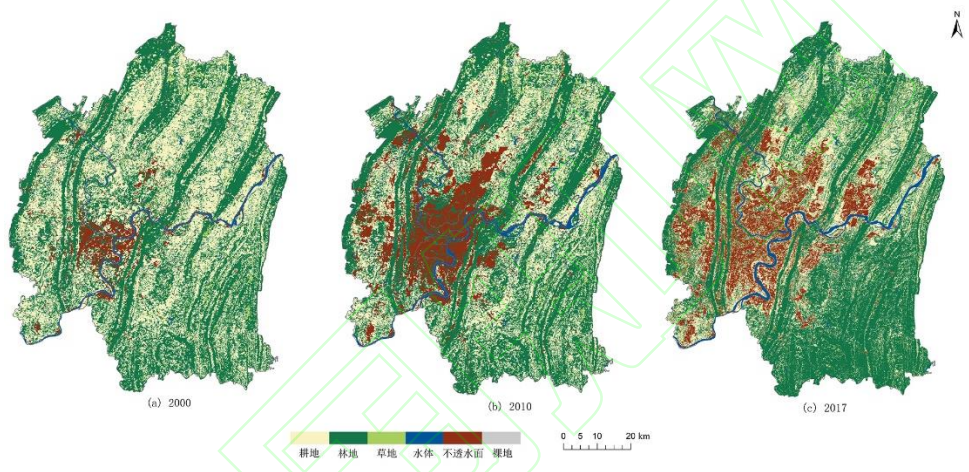


图 2 重庆市主城区 2000—2017 年土地利用结构时空分布
Fig.2 Spatio-temporal distribution of land use structure in the main urban area of Chongqing from 2000 to 2017

3.2 生态环境质量时空变化分析

表 4 为重庆市主城区 2000、2010、2017 年的 RSEI 主成分分析结果：在 PC1 中，绿度指标 NDVI 和湿度分量 Wet 为正，热度指标 LST 和干度指标 NDBSI 为负，符合现实中一定范围内，绿度、湿度对生态环境起正效应，而干度、热度对生态环境起负效应的客观事实，且三个时期 PC1 的特征值贡献率都大于 80%，说明 PC1 集中了各指标的大部分信息，可以合理解释生态环境质量状况。统计三个时期的各指标均值（表 5），20 年来，Wet 均值逐年降低，NDBSI 均值逐年升高，LST 均值先升高后降低，而 NDVI 均值逐年增加。RSEI 与 NDVI 变化趋势一致，与 NDBSI、LST 变化趋势相反。将 RSEI 模型计算结果以 0.2 为等间距等分成优、良、中等、较差、差 5 个等级（徐涵秋等，2013），统计三个时期研究区各等级面积占比变化（表 6）：2000—2010 年，优、良等级区域面积占比分别减少了 5.81%、6.89%，中、较差、差等级面积占比分别增加了 11.07%、1.02%、0.6%，整体生态环境质量变差。2010—2017 年，优、中、差等级分别减少了 0.24%、4.99%、0.44%，良、较差等级分别增加了 3.7%、1.96%，相较上一个 10 年，优等级变差速度降低，中、差等级区域生态有所恢复。对比 20 年来土地利用、生态环境质量变化情况（图 2、图 3），2000—2017 年，随着不透水面的扩张，环境较差等级范围向外扩大，生态环境变差趋势与城区扩张方向基本一致。而 20 年来缙云山、中梁山、铜锣山、明月山以及主城区北部、东南部的林地区域一直处于生态环境质量优、良等级，说明城市的开发扩张对生态环境质量影响显著。

表4 RSEI指标主成分分析结果
Table.4 Principal component analysis result of RSEI index

	2000				2010				2017			
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC1	PC2	PC3	PC4	PC1	PC2	PC3	PC4
Wet	0.547	0.493	0.338	0.586	0.508	0.474	0.446	0.565	0.691	0.414	0.482	0.345
NDVI	0.224	0.373	-0.900	-0.005	0.269	-0.878	0.180	0.352	0.720	-0.386	-0.514	-0.261
NDBSI	-0.532	0.779	0.192	-0.269	-0.709	0.038	-0.112	0.695	-0.037	0.737	-0.332	0.117
LST	-0.606	0.101	0.196	-0.764	-0.408	0.055	-0.869	0.273	-0.051	-0.369	-0.249	0.894
特征值	0.049	0.004	0.002	0.001	0.052	0.002	0.006	0.001	0.055	0.003	0.001	0.001
贡献率 (%)	82.11	8.15	6.32	1.42	83.35	8.49	6.51	1.65	85.88	7.35	5.05	1.72

表5 各年份RSEI指标均值
Table.5 Average value of RSEI indicator in each year

年份	指标	WET	NDVI	NDBSI	LST	RSEI
2000	均值	0.551	0.490	0.337	0.585	0.563
2010	均值	0.533	0.489	0.463	0.586	0.560
2017	均值	0.426	0.548	0.471	0.495	0.621

表6 重庆市主城区各年份生态环境质量等级面积占比
Table.6 Proportion of each grade of ecological environment quality in the main urban area of Chongqing

等级	2000		2010		2017	
	面积 (km ²)	比例(%)	面积 (km ²)	比例(%)	面积(km ²)	比例(%)
优	2149.299	40.36%	1855.663	34.55%	1824.207	34.31%
良	2325.195	43.66%	1974.740	36.77%	2151.476	40.47%
中等	513.287	9.64%	1112.367	20.71%	835.783	15.72%
较差	306.867	5.76%	364.060	6.78%	464.827	8.74%
差	31.293	0.59%	63.909	1.19%	40.023	0.75%

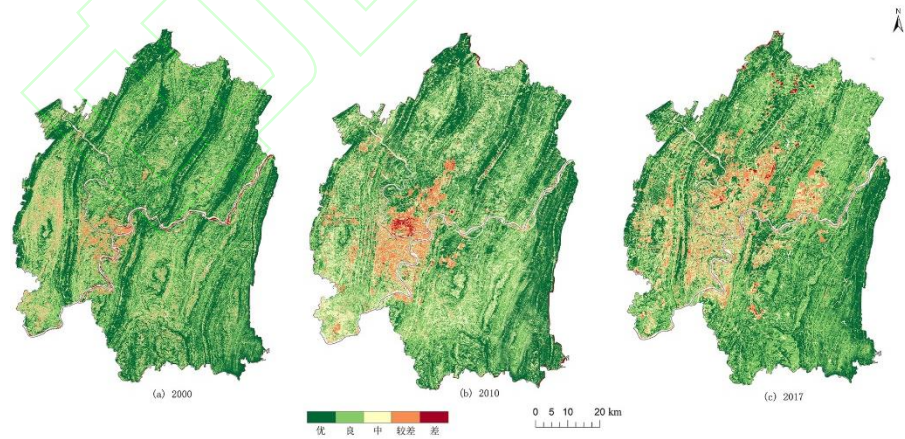


图 3 重庆市主城区 2000—2017 年生态环境质量评价结果
Fig.3 Evaluation results of ecological environment quality in the main urban area of Chongqing from 2000 to 2017

进一步统计各地类在 2000、2010、2017 年三个时期的生态环境质量情况（图 4）：耕地良等级以上面积占比为 80%、70%、71%，中等级为：13%、28%、21%，较差等级以下为：7%、2%、8%。林地良等级以上面积占比为 91%、83%、92%，中等级为：6%、13%、6%，较差等级以为：3%、4%、2%。草地良等级以上面积占比为 88%、78%、67%，中等级为 8%、20%、22%，较差等级以下

为 4%、2%、11%。水体良等级以上面积占比为：51%、50%、42%，中等级为：14%、28%、24%，较差等级以下为：35%、22%、34%。不透水面良等级以上面积占比为 53%、31%、25%，中等级为：16%、29%、38%，较差等级以下为：31%、40%、37%。裸地良等级以上面积占比为：28%、3%、6%，中等级为：12%、17%、20%，较差等级以下为：60%、80%、74%。综合分析可知，2000-2010 年耕地、林地、草地、不透水面、裸地的良等级以上面积占比大幅减少，2010-2017 年草地、不透水面良等级以上面积占比持续减少，而林地、裸地的良等级面积占比增加，尤其是林地良等级面积恢复到了 2000 年的占比；水体良等级以上面积占比 20 年来有所减少，但总体变化不大。

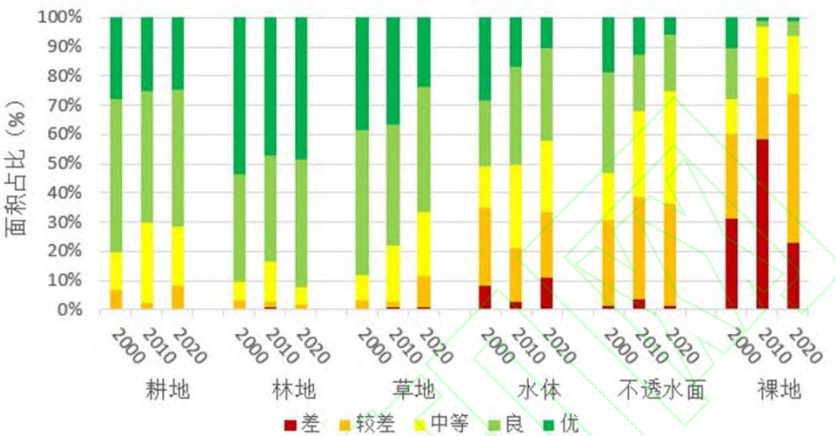


图 4 重庆市主城区 2000—2017 年各地类生态环境质量等级面积占比变化

Fig. 4 Changes in the proportion of the area of the ecological environment quality grades in the main urban area of Chongqing from 2000 to 2017

3.3 生态环境质量空间分异影响因素分析

分析研究区同一时期的生态环境质量状况不难发现，不同区域存在明显的空间分异。为进一步探索城市内部生态环境质量差异原因，基于城市设施 POI 数据，利用核密度估计方法揭示研究区功能设施空间分布现状，并探究其与生态环境之间的联系。

（1）重庆市主城区功能分布现状

研究区功能设施空间分布呈“多中心、多组团”格局（图 5）。商业商务类 POI（图 5(a)）在渝中、大杨石、观音桥-人和、大渡口、沙坪坝、南坪组团形成多个高密度极核，呈现向外溢出趋势。道路交通类（图 5(b)）以龙头寺铁路枢纽、两路机场及各轨道枢纽、汽车客运站为中心聚集，向外呈线状发散，覆盖密度逐渐降低。行政公服类 POI（图 5(c)）在中心各组团连片聚集，在西永、北碚、李家沱-鱼洞组团形成独立聚集区。工厂企业类 POI（图 5(d)）在渝中的聚集区主要由公司营业门店形成，而外围组团聚集区主要由传统工业产业、高新技术产业、汽车产业形成。景点绿地类 POI（图 5(e)）在缙云山、园博园、洪崖洞、鹅岭公园等自然、人文景点及城市公园广场聚集。居住生活类 POI（图 5(f)）除在中心各组团聚集效果显著外，在西永、两路、北碚、蔡家、南坪、茶园等组团亦形成聚集区。综上，重庆市主城区商务、行政中心区主要位于渝中、观音桥组团，承载主要的商务商贸、行政功能；承接外溢功能的城市副中心主要包括大杨石、沙坪坝、西永、南坪组团等地区；科教文化中心以北碚、沙坪坝组团为主；居住区分布在各组团中心，北碚、蔡家、两路、茶园组团为新兴居住区；交通、仓储物流区主要位于观音桥-人和组团的龙头寺、寸滩地区，两路组团空港地区和茶园组团的界石地区以及西永组团等；工业区主要位于大杨石、大竹林-礼嘉、西永、大渡口、西彭、唐家沱、两路、鱼嘴、茶园组团。人文景点集中在渝中、沙坪坝组团，自然景点集中在北碚缙云山，而绿地区分布较均匀，主要为各区（园博园、中央公园等）大型综合公园或社区公园、小游园。

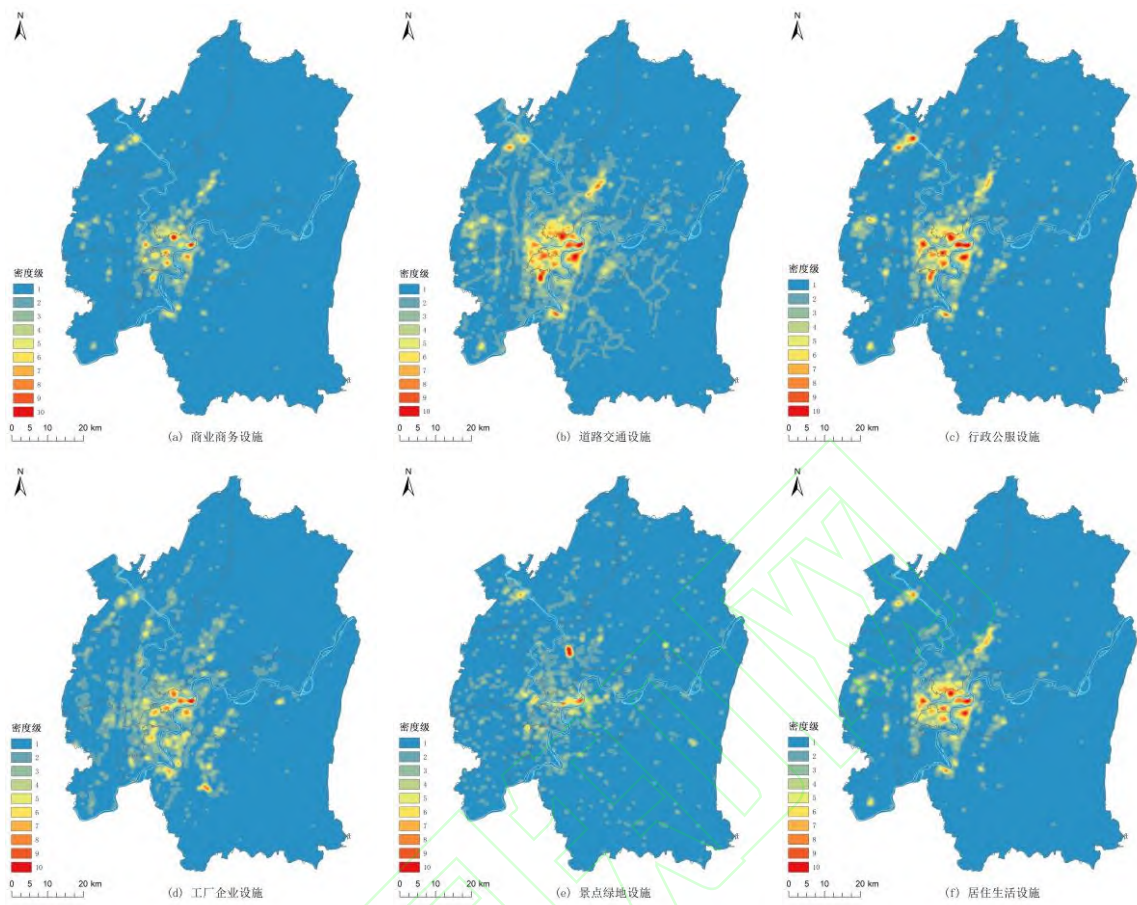


图 5 各类城市设施空间分布
Fig.5 Spatial distribution of various urban facilities

(2) 功能设施 POI 密度对生态环境质量的影响

各遥感指标直接影响生态环境质量评价结果，因此，基于地理探测器，对不同城市功能设施聚集差异下遥感指标变化情况进行探究。结合因子选取原则及研究区实际状况，以各功能设施 POI 密度为变量，构建如下的影响因子体系，按照地理探测器要求，所有输入自变量需经过离散化处理，因此，计算前对所用数据进行分类分级。本文将各遥感指标与 POI 密度级按照 1km×1km 的格网格点进行空间匹配处理，对其建立相同空间位置上的属性关联（无值区域不统计）。分析因子探测结果（表 6），各类功能设施 POI 对各遥感指标的解释力不同，总体上对 NDVI 和 LST 的解释力较强，对 WET 和 NDBSI 解释力较弱。

表7影响因子体系及因子探测器结果
Table.7 Impact factor system and factor detector results

因子类别	代理变量	q 值			
		NDVI	WET	LST	NDBSI
城市功能设施	行政公服设施密度	0.137	0.005	0.067	0.001
	广场绿地设施密度	0.056	0.001	0.021	0.001
	商业商务设施密度	0.090	0.003	0.037	0.000
	居住生活设施密度	0.143	0.004	0.065	0.001
	工厂企业设施密度	0.151	0.010	0.086	0.001
	道路交通设施密度	0.177	0.006	0.088	0.001

利用风险探测器进一步探索各遥感指标受各类城市设施 POI 影响情况，响应趋势线如图 6 所示：总体上，NDVI、LST 对各类别城市设施 POI 密度变化敏感，WET、NDBSI 不敏感。NDVI 随商业商务、工厂企业、道路交通、行政公服、生活居住设施 POI 密度升高呈降低态势，但在商业商务、工厂企业、道路交通设施影响下其降低幅度较大，在行政公服、生活居住设施影响下降低幅度小，趋势较缓，最终能保持相对稳定状态。NDVI 随景点绿地设施 POI 密度升高，先下降后增大，可见当景点绿地设施达到一定密度级时，能够显著优化城市植被状况。LST 除随景点绿地设施 POI 密度升高而降低外，随其他设施 POI 密度升高，始终处于上升状态，高温区与高密度区一致，尤其是工厂企业、道路设施聚集区域地表温度上升显著，即工业用地及交通用地易形成“热岛”，而景点绿地易形成“冷岛”。WET、NDBSI 对 POI 密度变化响应不明显，表明地表湿度和建筑、裸土状况受影响不大

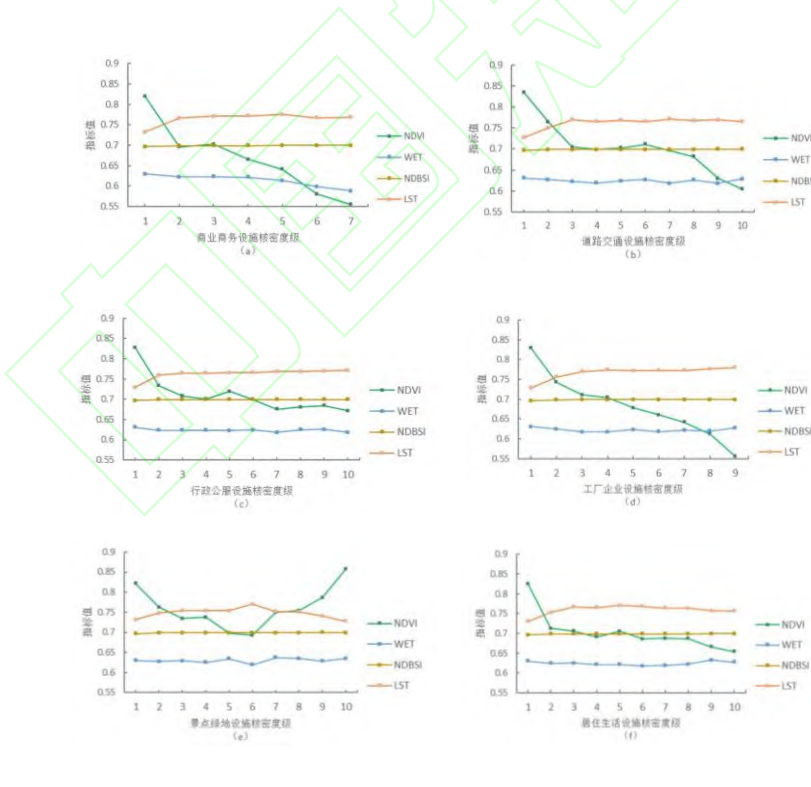


图 6 城市功能设施影响下各遥感指标风险探测器结果
Fig.6 Risk detector results of remote sensing indicators under the influence of urban functional facilities

(3) 功能设施核密度影响下 RSEI 评价结果

由上述分析可知，NDVI、LST 受城市设施 POI 密度变化影响较大，因此尝试将归一化后的 POI

密度值作为评价指标引入 RSEI 模型，得到各指标主成分分析结果（表 8）：融入功能设施 POI 密度指标后，减弱了 WET、NDVI 指标载荷，而使 NDBSI、LST 指标载荷得到突出，能更精细反映不同城市设施 POI 聚集差异引起的区域生态环境质量分异，其中，景点绿地区域 RSEI 值最高，工厂企业区域 RSEI 值最低。由图 7 可知，商务商业设施影响范围广，尤其是各大商圈（观音桥、解放碑、大坪、沙坪坝等）生态环境质量较差；主要道路设施（四公里、菜园坝、袁家岗立交等）和大型交通枢纽（江北机场、重庆北站、重庆站、沙坪坝站等）区域生态环境质量较差，而道路沿线受影响程度不大；行政公服、居住生活设施影响范围相对小，仅高密度区域环境较差；工厂企业设施影响明显，工业区（空港、鱼嘴、新桥、鹿角等工业园）及其周边环境都较差；而景点绿地设施有利影响显著，绿地区（缙云山、歌乐山、南山、园博园等）其周边均处于优良等级。

表8 POI密度影响下各指标主成分分析、RSEI评价结果
Table.8 Principal component analysis and RSEI evaluation results of various indicators under the influence of POI density

指标	类别	原值	商业商务	道路交通	行政公服	居住生活	景点绿地	工厂企业
Wet	均值	0.426	0.612	0.533	0.631	0.601	0.631	0.412
	对 PC1 载荷	0.691	0.072	0.063	0.066	0.071	0.063	0.077
NDVI	均值	0.548	0.753	0.489	0.788	0.774	0.812	0.530
	对 PC1 载荷	0.720	0.008	0.038	0.029	0.023	0.020	0.039
NDBSI	均值	0.471	0.698	0.463	0.698	0.665	0.455	0.698
	对 PC1 载荷	-0.037	-0.492	-0.550	-0.478	-0.551	-0.494	-0.580
LST	均值	0.495	0.735	0.755	0.586	0.701	0.479	0.735
	对 PC1 载荷	-0.051	-0.868	-0.832	-0.875	-0.831	-0.867	-0.810
POI	均值	/	0.005	0.019	0.016	0.012	0.007	0.009
	对 PC1 载荷	/	-0.008	-0.007	-0.008	-0.007	-0.007	-0.007
RSEI	均值	0.621	0.707	0.751	0.735	0.687	0.758	0.657

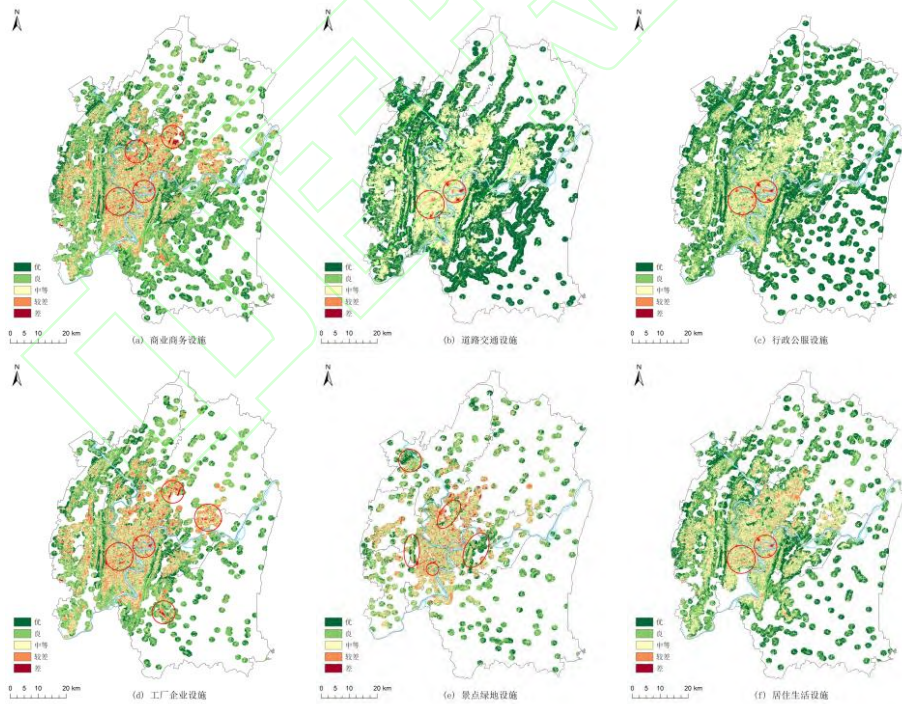


图 7 结合 POI 密度的 RSEI 生态环境质量评价结果
Fig.7 RSEI ecological environment quality assessment results combined with POI density

4 结论

本文以重庆市主城区为例，将遥感数据与城市功能设施 POI 数据相结合，进行城市生态环境质量

时空变化探究,并在精细化尺度下分析生态环境质量空间分异的影响因子,主要结论如下:

(1) 2000—2017 年,重庆市主城区生态环境处于优、良等级的面积占比分别减少 6.04%、3.19%,而中、较差、差等级面积占比分别增加 6.08%、2.98%、0.17%。其中,耕地、不透水面、裸地的优、良等级占比大幅减少,而林地优、良等级占比先减少后恢复。生态环境质量受城市建设影响显著,其变差趋势与城区扩展方向相符。

(2) 重庆市主城区功能分布现状呈“多中心、多组团”结构:商务、行政、居住区中心位于渝中、观音桥-人和组团,副中心包括大杨石、沙坪坝、西永、南坪组团;科教文化中心以北碚、沙坪坝组团为主;北碚、蔡家、两路、茶园组团为新兴居住区;交通、仓储物流区位于龙头寺、寸滩、空港、西永、界石地区;工业区主要位于大渡口、唐家沱、西彭、茶园、鱼嘴组团;绿地区分布较均匀,主要为自然风景区、大型综合公园或社区公园、小游园。

(3) 融合 POI 数据后能更精细化揭示城市不同功能设施聚集情况对生态环境质量空间分异的影响。NDVI、LST 对城市设施 POI 密度变化敏感,WET、NDBSI 不敏感。其中,工企、交通设施聚集区 NDVI 偏低、LST 较高,对生态环境不利影响显著,易形成环境差的“热岛”;而景点绿地设施聚集区 NDVI 最高,LST 最低,特别是山体、公园区域具有显著的降温作用,易形成环境优的“冷岛”;商业商务、行政、居住设施聚集区 NDVI 处于中间值,商务、居住区 LST 偏高。可见,在城市建设中应严格保护自然生态源地,适量增加大型公园绿地,注重工业、交通区域的合理布局,在商业、行政、居住区的开发中应注重植被恢复,配套建设绿化设施。

References

- [1] MA Ting. Spatiotemporal characteristics of urbanization in China from the perspective of remotely sensed big data of nighttime light [J]. Journal of Geo-Information Science(in Chinese),2019,21(1):59-67.
- [2] Xia Han,Zhang Wanshun,PengHong et al. Evaluation of ecological functions of urbanized areas based on the plan for major functional areas in China[J]. Scientia Geographica Sinica(in Chinese),2020,40(6):882-889.
- [3] OUYANG Xiao,ZHU Xiang. Spatio-temporal characteristics of urban land expansion in Chinese urban agglomerations[J]. Journal of Geographical Sciences(in Chinese), 2020,75(3):571-588. Doi:10.11821/dlxb202003010
- [4] JU Xinhui,GAO Xiao,LI Weifeng,et al. Effects of land use change on surface runoff in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration[J]. Acta Ecologica Sinica(in Chinese), 2020,40(4):1413-1423. Doi:10.5846/stxb201812262819
- [5] WANG Sitong,YANG Dongfeng. Review on compact city studies: A sound strategy towards sustainability?[J]. Urban Planning Forum(in Chinese),2011,(6):48-53. Doi:10.3969/j.issn.1000-3363.2011.06.008.
- [6] MA Li, JIN Fengjun. Evaluation of Chinese Urban Compactness[J]. Progress in Geography(in Chinese), 2011,30(8):1014-1020. Doi:10.11820/dlxxjz.2011.08.008
- [7] XU Hanqiu. A remote sensing index for assessment of regional ecological changes[J]. China Environmental Science(in Chinese), 2013, 33(5):889-897. Doi:10.3969/j.issn.1000-6923.2013.05.019
- [8] HAN GuiFeng, XU JianHua. Vegetation change trajectory and the reasons in Shanghai City[J]. Acta Ecologica Sinica(in Chinese), 2009(4):1793-1803. Doi:10.3321/j.issn:1000-0933.2009.04.021
- [9] Basnyat P, Teeter L D, Lockaby B G, et al. The use of remote sensing and GIS in watershed level analyses of non-point pollution problems. Forest Ecology and Management[J]. Forest Ecology and Management, 2000, 128:65-73.
- [10] LI Xianhua,XU Lihua,ZENG Qihong et al. Research on atmospheric path radiation remote sensing image and urban atmospheric pollution monitoring[J]. JOURNAL OF REMOTE SENSING(in Chinese),2008(5):780-785. Doi:10.3321/j.issn:1007-4619.2008.05.015
- [11] Xu HanQiu,Ding Feng,Wen XiaoLe. Urban expansion and heat island dynamics in the Quanzhou region, China [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2009,2(2):74-79. Doi:10.1109/JSTARS.2009.2023088
- [12] WANG Jie,MA Jiali,XIE Feifei et al. Improvement of remote sensing ecological index in arid regions: Taking Ulan Buh Desert as an example[J]. Chinese Journal of Applied Ecology(in Chinese), 2020, 31(11):3795-3804. Doi:10.13287/j.1001-9332.202011.011
- [13] SONG Meijie,LUO Yanyun,DUAN Limin. Evaluation of ecological environment in the Xilin Gol steppe based on modified remote sensing ecological index model[J]. Arid Zone Research(in Chinese), 2019,36(6):1521-1527. Doi:10.13866/j.azr.2019.06.22
- [14] Xing Yi,Zheng Binghui. The study of urban landscape remote sensing monitoring technology[J]. Chinese Journal of Environmental Science(in Chinese), 2002(S1):99-102. Doi:CNKI:SUN:HJKZ.0.2002-S1-020
- [15] LU Wei,LI Shu,WENHongyan et al. Integrated analysis of landscape ecological pattern of the city based on RS[J]. GEOSPATIAL INFORMATION(in Chinese), 2009, 7(2): 62-64. Doi:10.3969/j.issn.1672-4623.2009.02.022
- [16] Mao Hanying,Gao Qun,Feng Renguo. The selection of pillar industries under the ecologically and environmentally friendly principles in three Gorges Area[J]. ACTA GEOGRAPHICA SINICA(in Chinese),2002,57(5):553-560. Doi:10.3321/j.issn:0375-5444.2002.05.007
- [17] XU Hanqiu. A remote sensing urban ecological index and its application[J]. Acta Ecologica Sinica(in Chinese),2013,33(24):7853-7862. Doi:10.5846/stxb201208301223
- [18] ZHAO Weifeng,LI Qingquan,LI Bijun. Extracting hierarchical landmarks from urban POI data[J]. Journal of Remote Sensing(in Chinese),2011,15(5):973-988. Doi:10.11834/jrs.20110173
- [19] XU Zening,GAO Xiaolu. A novel method for identifying the boundary of urban built-up areas with POI data[J]. Acta Geographica Sinica(in Chinese), 2016,71(6), 928-939. Doi:10.11821/dlxb201606003
- [20] DUAN Yaming,LIU Yong,LIU Xiuhua et al. Identification of polycentric urban structure of central Chongqing using points of interest big data[J]. Journal of Natural Resources(in Chinese), 2018, 33(5): Doi:10.11849/zrzyxb.20170945
- [21] XUE Bing,XIAO Xiao,LI Jingzhong et al. POI-Based analysis on retail's spatial hot blocks at a city level: A case study of Shenyang, China[J]. Economic Geography(in Chinese), 2018, 38(5): 36-43. Doi:10.15957/j.cnki.jjdl.2018.05.005

- [22] HAN Shanrui, WEI Sheng, ZHOU Wen et al. Quantifying the spatial pattern of urban thermal fields based on point of interest data and Landsat images[J]. *Acta Ecologica Sinica*(in Chinese), 2017, 37(16):5305-5312. Doi:10.5846/stxb201605301037
- [23] LUAN Xiali, WEI Sheng, HAN Shanrui et al. A multi-scale study on the formation mechanism and main controlling factors of urban thermal field based on urban big data[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*(in Chinese), 2018, 29(9): 2861-2868. Doi:10.13287/j.1001-9332.201809.015
- [24] Goward S N, Xue Y K, 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. Doi:10.1016/S0034-4257(1)00275-9
- [25] Crist E P. A TM Tasseled Cap equivalent transformation for reflectance factor data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1985, 17(3):301-306. DOI:10.1016/0034-4257(85)90102-6
- [26] 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. Doi:10.1080/01431160110106113
- [27] LI Hua, ZENG Yongnian, YUN Peidong et al. Study on retrieval urban land surface temperature with multi-source remote sensing data[J]. *JOURNAL OF REMOTE SENSING*(in Chinese), 2007, 11(6):891-898. Doi:10.3321/j.issn:1007-4619.2007.06.017
- [28] Maldonado F D, Santos J R D, De Carvalho V C. Land use dynamics in the semi-arid region of Brazil (Quixaba, PE): Characterization by principal component analysis (PCA)[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2002, 23(23):5005-5013. DOI:10.1080/0143116021000013313
- [29] YU Wenhao, AI Tinghua, LIU Pengcheng et al. Network kernel density estimation for the analysis of facility POI hotspots[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*(in Chinese), 2015, 44(12): 1378-1383, 1400. Doi:10.11947/j.AGCS.2015.20140538
- [30] LU Min, YANG Liu, WANG Jinyin et al. Applications of pointgroup density cartography based on kernel density estimation[J]. *Engineering of Surveying and Mapping*(in Chinese), 2017, 26(4): 70-74+80. Doi:10.19349/j.cnki.issn1006-7949.2017.04.013
- [31] WANG Jinfeng, XU Chengdong. Geodetector: Principle and prospective[J]. *Acta Geographica Sinica*(in Chinese), 2017, 72(1):116-134. Doi:10.11821/dlxb201701010
- [32] 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.
- [33] 夏函, 张万顺, 彭虹, 李琳, 黄攀攀, 夏晶晶. 基于主体功能区规划的中国城市化地区生态功能评估[J]. *地理科学*, 2020, 40(6): 882-889.
- [34] 欧阳晓, 朱翔. 中国城市群城市用地扩张时空动态特征[J]. *地理学报*, 2020, 75(3): 571-588. Doi: 10.11821/dlxb202003010
- [35] 巨鑫慧, 高肖, 李伟峰, 等. 京津冀城市群土地利用变化对地表径流的影响[J]. *生态学报*, 2020, 40(4): 1413-1423. Doi: 10.5846/stxb201812262819
- [36] 汪思彤, 杨东峰. 紧凑城市的系统检讨[J]. *城市规划学刊*, 2011, 000(6): 48-53. Doi: 10.3969/j.issn.1000-3363.2011.06.008.
- [37] 马丽, 金凤君. 中国城市化发展的紧凑度评价分析[J]. *地理科学进展*, 2011, 30(8): 1014-1020. Doi: 10.11820/dlkxjz.2011.08.008
- [38] 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. Doi: 10.3969/j.issn.1000-6923.2013.05.019
- [39] 韩贵锋, 徐建华. 上海城市植被变化轨迹及其成因分析[J]. *生态学报*, 2009(4): 1793-1803. Doi: 10.3321/j.issn:1000-0933.2009.04.021
- [40] 李先华, 徐丽华, 曾齐红, 等. 大气程辐射遥感图像与城市大气污染监测研究[J]. *遥感学报*, 2008(5): 780-785. Doi: 10.3321/j.issn:1007-4619.2008.05.015
- [41] 王杰, 马佳丽, 解斐斐, 徐锡杰. 遥感生态指数在干旱地区的改进——以乌兰布和沙漠为例[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(11): 3795-3804. Doi: 10.13287/j.1001-9332.202011.011
- [42] 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. Doi: 10.13866/j.azr.2019.06.22
- [43] 邢治, 郑丙辉. 城市景观生态遥感监测技术研究[J]. *环境科学*, 2002(S1): 99-102. Doi: CNKI: SUN: HJKZ. 0.2002-S1-020
- [44] 卢伟, 李淑, 文鸿雁, 等. 基于遥感的城市景观生态环境格局分析[J]. *地理空间信息*, 2009(2): 67-69. Doi: 10.3969/j.issn.1672-4623.2009.02.022
- [45] 毛汉英, 高群, 冯仁国. 三峡库区生态环境约束下的支柱产业选择[J]. *地理学报*, 2002, 57(5): 553-560. Doi: 10.3321/j.issn:0375-5444.2002.05.007
- [46] 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. Doi: 10.5846/stxb201208301223
- [47] 赵卫锋, 李清泉, 李必军. 利用城市 POI 数据提取分层地标[J]. *遥感学报*, 2011, 15(5): 973-988. Doi: 10.11834/jrs.20110173
- [48] 许泽宁, 高晓路. 基于电子地图兴趣点的城市建成区边界识别方法[J]. *地理学报*, 2016, 071(6): 928-939. Doi: 10.11821/dlxb201606003
- [49] 段亚明, 刘勇, 刘秀华, 等. 基于 POI 大数据的重庆主城区多中心识别[J]. *自然资源学报*, 2018, 33(5): 788-800. Doi: 10.11849/zrzyxb.20170945
- [50] 薛冰, 肖骁, 李京忠, 等. 基于 POI 大数据的城市零售业空间热点分析——以辽宁省沈阳市为例[J]. *经济地理*, 2018(5): 36-43. Doi: 10.15957/j.cnki.jjdl.2018.05.005
- [51] 韩善锐, 韦胜, 周文, 张明娟, 陶婷婷, 邱廉, 刘茂松, 徐驰. 基于用户兴趣点数据与 Landsat 遥感影像的城市热场空间格局研究[J]. *生态学报*, 2017, 37(16): 5305-5312. Doi: 10.5846/stxb201605301037
- [52] 栾夏丽, 韦胜, 韩善锐, 等. 基于城市大数据的热场格局形成机制及主导因素的多尺度研究[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(9): 67-74. Doi: 10.13287/j.1001-9332.201809.015
- [53] 历华, 曾永年, 负培东, 等. 利用多源遥感数据反演城市地表温度[J]. *遥感学报*, 2007, 11(6): 891-898. Doi: 10.3321/j.issn:1007-4619.2007.06.017
- [54] 禹文豪, 艾廷华, 刘鹏程, 等. 设施 POI 分布热点分析的网络核密度估计方法[J]. *测绘学报*, 2015, 44(12): 1378-

- 1383, 1400. Doi: 10. 11947/j. AGCS. 2015. 20140538
- [55] 卢敏, 杨柳, 王金茵, 等. 基于核密度估计的点群密度制图应用研究[J]. 测绘工程, 2017, 26 (4): 70-74+80. Doi: 10. 19349/j. cnki. issn1006-7949. 2017. 04. 013
- [56] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72 (1): 116-134. Doi: 10. 11821/dlxb201701010

