

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

苟晓娟, 刘 瑞, 李谷琳

(成都理工大学地球物理学院, 成都 610059)

摘要: 为研究中国西南地区山地城市的生态环境质量, 选择以重庆市为例, 利用遥感技术和 Google Earth Engine(GEE)平台, 构建遥感生态指数(RSEI, remote sensing ecological index), 评价重庆市2000年~2021年的生态环境质量及其长时序变化。为探讨山地城市生态环境质量的主要影响因素, 选取海拔、坡度、气温和降水四个影响因子, 得到RSEI的海拔依赖性与坡度依赖性以及RSEI与气候因子的响应关系。结果表明:①遥感生态指数RSEI总体呈上升趋势, 生态质量为“优”的面积增加了130.27%, 生态质量为“差”的面积减少了65.68%, 生态环境有明显的改善;②从RSEI随海拔、坡度变化曲线可以看出, 0 m~1 800 m范围内RSEI缓慢增加, 1 800 m~2 800 m范围内开始减小, RSEI随坡度增加而增长, 坡度 $>40^\circ$ 之后RSEI趋于平稳;③从RSEI与气候因子的响应曲线可以看出, 温度和RSEI呈负相关, 温度越高, RSEI越低;随着降水的增加, RSEI指数逐渐上升。研究表明, 使用GEE平台可以对多云雾、植被覆盖度高的西南山地城市的生态环境质量进行长时序的监测和评价。研究结果可为中国西南地区山地城市的生态环境保护提供精细化管理, 从而根据区域特色进行环境治理, 实现生态环境与经济的协调发展。

关键词: Google Earth Engine; RSEI; 西南山地城市; 重庆; 海拔; 气候; 生态保护

中图分类号: X821 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1749.2024.02.12

0 引言

一个城市的生态环境是与人类生存和发展息息相关的气候资源、海洋资源、矿产资源、土地资源、生物资源、以及水资源的总称, 是影响人类社会和经济发展可持续发展的综合生态系统, 是人类生存和发展的主要物质来源^[1]。生态环境质量的优劣不仅关系到人们的日常住行, 更关系到人们的身心健康。随着我国经济社会的飞速发展, 城市的工业化、城镇化水平不断提高, 沥青、水泥等组成的不透水表面取代了部分土壤、湿地、水面以及植被等土地覆被类型, 这

个过程导致地表水分蒸腾减少、径流加速等一系列如城市热岛等的生态环境效应^[2]。

党的十八大以来, 国家强调走集约、智能、绿色、低碳的新型城镇化道路。随着新时代中国经济和城镇化开始由高速增长转向高质量发展, 国家日益重视生态环境评估与保护^[3]。2006年, 中华人民共和国生态环境部颁发了《生态环境状况评价技术规范》^[4], 根据生物丰度指数, 植被覆盖指数, 水网密度指数, 土地退化指数和环境质量指数构建的生态指数(Ecological Index, EI), 旨在对我国县级以上生态环境提供一种年度综合评价标准, 在区域生态环

收稿日期: 2022-11-15

基金项目: 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室项目(SKLG2022K026); 福建省空间信息感知与智能处理重点实验室项目(FKLSIPI1002)

第一作者: 苟晓娟(1995—), 女, 硕士, 主要从事遥感与生态环境评估方面的研究, E-mail: 1814869426@qq.com。

通信作者: 刘瑞(1979—), 男, 博士, 副教授, 主要从事地球探测与信息技术方面的研究, E-mail: lr@cdut.edu.cn。

境质量 (Ecological Environmental Quality, EEQ) 评估方面得到了广泛应用^[5],王瑶等^[6]以 TM、SPOT4 及 QuickBird 遥感影像为数据源,运用生态环境状况评价技术评价北京市生态环境质量变化情况,发现降水量的减少、城市化扩张以及人为因素是影响生态环境质量变化的主要原因。随着人们对生态环境问题相关研究的重视,有关生态环境质量动态监测和评价的方法越来越多^[7],随着美国 Landsat 卫星和法国 SPOT 卫星的发展,3S 技术以快速、实时及范围广等监测特点在对生态环境的研究中成为了中坚力量,国内外学者通过遥感影像获取陆地表面的信息,并结合数学方法对生态环境进行了定量研究^[8-12]。徐涵秋^[13]在生态指数 EI 的基础上提出的遥感生态指数 (remote sensing ecological index, RSEI),能够客观、快速监测和评价生态环境质量变化,与过去较为单一的量化生态状况的遥感指数如归一化植被指数 (NDVI)、增强植被指数 (EVI)、永久植被分数 (PVF) 和干旱条件指数 (SDCI) 等不同,遥感生态指数结合了绿度、湿度、干度、热度,全面地评估了区域的综合生态状况。遥感生态指数所需要的四个指标获取简便且通俗易懂,并且权重不需要人为设定,是一种客观、便捷、高效的遥感生态环境质量监测和评价的技术手段^[13-14]。

笔者以重庆市为例,基于遥感技术研究中国西南地区山地城市的生态环境质量。重庆地处中国西南,滋养于长江与嘉陵江交汇处,四面群山环绕,是中国西南地区的经济中心和金融中心城市之一,是一座举世闻名的山城。三峡水库重庆段的生态环境历年来也受到学者们的关注^[15]。我国西南地区地形复杂,以盆地、丘陵地形为主,北有黄土高原,南有云贵高原,西有青藏高原,东有巫山、大巴山,四周均是高山峻岭,重庆市作为西南山地城市的代表,其生态环境质量在 2000 年以来,随着城市化的发展和生态环境的有效治理,生态环境有了明显好转。研究重庆市的生态环境变化及其影响因素,可为学者研究西南地区的其他城市的生态提供参考。笔者基于遥感影像数据处理技术和 Google Earth Engine (GEE) 平台,分析 2000 年~2021 年重庆市的生态环境时空变化,并研究了海拔、坡度、气候因子对生态环境质量的作用,以期重庆市的生态环境治理提供科学依据,为西南地区的生态环境保护提供因地制宜的措施。

1 研究区概况

重庆市位于四川省西南部,拥有部分喀斯特地貌,是中国西南地区典型的山地城市,经纬度范围分别为东经 105°11′~110°11′、北纬 28°10′~32°13′。重庆作为中国西南地区的直辖市,经济发达,航运和商贸畅通,是西部大开发、“一带一路”和长江经济带的重要战略支点。重庆市境内北有大巴山,南有大娄山、东有巫山,东南有武陵山,河流有长江、嘉陵江等,长江干流自西向东 865 km 流程,形成了著名的长江三峡。重庆气候属亚热带季风性湿润气候,年平均降水量较丰富,大部分地区在 1 000 mm~1 350 mm,年平均气温 16℃~18℃。

重庆市最高海拔 2 796.8 m,最低海拔 73.1 m,海拔高差达 2 723.7 m,以山地为主,面积占 76%,丘陵占 22%。其中,海拔 500 m 以下的面积占幅员面积 38.61%;海拔 500 m~800 m 占幅员面积的 25.41%;海拔 800 m~1 200 m 占幅员面积的 20.42%;海拔 1 200 m 以上占幅员面积的 15.56%。重庆地势特点为:东南部、东北部高,中部和西部低,海拔由南北向长江河谷逐渐放缓^[16-17]。

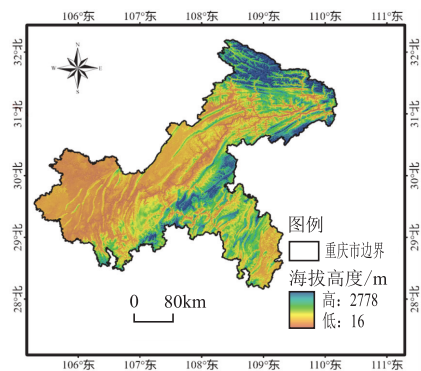


图 1 研究区地理位置示意图

Fig. 1 A map showing the geographical position of the study area

2 研究方法与预处理

由于重庆市地处西南地区,遥感影像质量受云、雨遮盖影响较大,无云影像多集中于秋、冬季节,其他时期影像云量覆盖率高,同时考虑到夏季植被覆盖率较高,可用每一年的夏季影像进行生态环境的评价,因此在 GEE 平台上选择每年 7 月~9 月的影像,并且筛选云量,对所选图像进行均值提取,消除

去云图像之间的色差等问题,以保证遥感影像数据来源的可靠性。

构建遥感生态指数(Remote Sensing Ecological Index, RSEI),需要 4 个指标,即绿度、湿度、热度、干度,笔者基于这四个指标选取 MODIS 产品库中相应的标准产品作为数据源。影像数据来源于美国地质调查局(USGS)(USGS, <https://earthexplorer.usgs.gov>) MODIS 系列数据。数据来源具体见表 1。

1) MODIS 系列数据。Google earth engine 平台提供的 MOD13A1 V6 产品空间分辨率为 500 m, 时间分辨率 16 d, 满足研究区对数据的需求。MODIS 系列数据中的植被层即归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI), 由国家海洋和大气管理局高级甚高分辨率辐射计(NOAA-AVHRR)导出, MODIS NDVI 产品是由大气校正的双向地表反射率计算而来的, 这些反射率被水、云、重气溶胶和云影掩盖。为构建 RSEI, 笔者选取 MOD13A1 V6 产品 NDVI 波段。同时选取 MOD11A2 提供地表温度(Land Surface Temperature, LST), 求取 RSEI 的“热度”成分。

MOD09A1 V6 卫星影像数据提供了 Terra MODIS 波段 1~7 的表面光谱反射率, 并进行了大气校正。对于每个像素, 在高观测覆盖、低视角、无云或云影、气溶胶负荷的基础上, 从 8 天复合材料内的所有采集中选择一个值。笔者使用 MOD09A1 计算湿度(WET)以及干度(Normalized Difference Build-up and Soil Index, NDBSI)。

表 1 数据来源

Tab. 1 The data source

数据来源	空间/时间分辨率	用途	时间跨度
MOD13A1 V6	500 m/16 d	提供 NDVI	2000~2021
MOD11A2 V6	1 km/8 d	提供 LST	2000~2021
MOD09A1	500 m/8 d	计算 WET 和 NDBSI	2000~2021

2) 气象数据。因气象站点数据在时间序列上缺失比较严重, 难以满足长时间序列的研究, 笔者选取来自高分辨率山地环境制图计划(Fine Resolution Mapping of Mountain environment, FRMM)再分析数据, 《中国 30 米分辨率气温数据集》、《中国 30 米分辨率年降水量数据集》, 为 1991 年~2020 年 30 年气候年平均值, 近似地代替 2000 年~2021 年的平均值。该气象数据为本文的研究提供了很大的帮助。

3) 行政区矢量边界。研究区的行政边界数据下载于全国基础地理数据库(<http://www.webmap.cn/>)提供的 2020 年中国 1:400 万省级行政区界线。

2.2 研究方法

2.2.1 RSEI 分量指标计算

遥感生态指数的四个分量指标如公式所示:

1) 绿度指标(NDVI): 归一化植被指数 NDVI 是应用最广泛的估算植被覆盖度的指数^[18-21]。多种卫星遥感数据反演植被指数 NDVI 产品为研究生态环境提供了方便, 因此笔者选用 NDVI 来代表绿度指标, 如公式 1 所示:

$$NDVI = \frac{(\rho_{nir} - \rho_{red})}{(\rho_{nir} + \rho_{red})} \quad (1)$$

其中, 式中 ρ_{nir} 、 ρ_{red} 分别表示遥感影像所对应的红波段和近红外波段的反射率。

2) 热度指标(LST): 热度表示地球表面温度, 太阳的热能被辐射到达地面后, 一部分被反射, 一部分被地面吸收, 使地面增热, 学者们基于卫星的热红外传感器观测到的地表热辐射进行地表温度的反演, 本文使用 MOD11A2 V6 中提供的 LST 数据。

3) 干度指标(NDBSI): 衡量一个地区因建筑用地、裸地造成的地表干度, 城市地表干燥会对生活条件和生物丰富度产生巨大影响, 成为衡量生态环境水平的重要指标^[22]。为了量化一个地区的干度成分, 笔者基于裸土指数(BI)^[23]和基于建筑指数(IBI)构建了归一化差值累积和土壤指数(NDBSI)^[11]。如公式(2)~公式(4)所示:

$$NDBSI = (BI + IBI) / 2 \quad (2)$$

$$IBI = \frac{\frac{2\rho_{swir1}}{\rho_{swir1} + \rho_{nir1}} - \left[\frac{\rho_{nir1}}{\rho_{nir1} + \rho_{red}} + \rho_{green} / (\rho_{green} + \rho_{swir1}) \right]}{\frac{2\rho_{swir1}}{\rho_{swir1} + \rho_{nir1}} + \left[\frac{\rho_{nir1}}{\rho_{nir1} + \rho_{red}} + \rho_{green} / (\rho_{green} + \rho_{swir1}) \right]} \quad (3)$$

$$BI = \frac{[(\rho_{swir1} + \rho_{red}) - (\rho_{nir1} + \rho_{blue})]}{[(\rho_{swir1} + \rho_{red}) + (\rho_{nir1} + \rho_{blue})]} \quad (4)$$

其中 ρ_{red} 、 ρ_{blue} 、 ρ_{green} 、 ρ_{nir1} 和 ρ_{swir1} 分别为 MOD09A1 V6 图像中对应波段的地表反射率。

4) 湿度指标(WET): 湿度指标反映了地球表面的水体和土壤、植被和绿地的湿润程度, 与生态环境质量密切相关, 已有研究证实 Kauth-Thomas (K-T) 变换是一种有效的数据压缩和去冗余技术, 其亮度、绿度和湿分量与表面物理参数直接相关^[24-25], 被广泛用于生态环境评价中的湿度监测^[26]。笔者采用 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。公式定义为公式 5:

$$Wet = c_1 \rho_{red} + c_2 \rho_{nir1} + c_3 \rho_{blue} + c_4 \rho_{green} + c_5 \rho_{nir2} + c_6 \rho_{swir1} + c_7 \rho_{swir2} \quad (5)$$

其中 ρ_{red} 、 ρ_{nir1} 、 ρ_{blue} 、 ρ_{green} 、 ρ_{nir2} 、 ρ_{swir1} 和 ρ_{swir2} 分别代表 MOD09A1 图像的 7 个波段的反射率。对于 MODIS 多波段图像,各波段系数为 $c_1 = 0.1147$, $c_2 = 0.2489$, $c_3 = 0.2408$, $c_4 = 0.3132$, $c_5 = -0.3122$, $c_6 = -0.6416$, $c_7 = -0.5087$ 。

2.2.2 遥感生态指数模型构建

RSEI 是近几年提出的一种综合生态指数,专门利用遥感技术评估生态状况。遥感生态指数 RSEI 的构建需要整合绿度(NDVI)、湿度(WET)、热度(LST)和干度(NDBSI)四个分量,再将四个单一分量进行叠加后,进行主成分分析(Principal Component Analysis, PCA),并将第一主成分作为 RSEI 的值。利用主成分分析法可以根据每个指标对生态环境质量的贡献度来客观确定其权重,比以往的单一指标、人工确定权重的方法更为科学,不但能够同时整合绿度、湿度、热度、干度 4 个指标的信息,而且还能够以单一指标的形式代表地区的生态环境质量。因此,RSEI 可以表示为:

$$RSEI = f(NDVI, WET, LST, NDBSI)$$

由于各指标的单位和数据范围不同,在进行主成分分析之前,需要将四个指标的值归一化在 $[0, 1]$ 范围内,RSEI 值越大且靠近 1,表示生态环境质量越好,RSEI 值越小且靠近 0,表示生态环境质量越差。

2.2.3 海拔梯度和坡度的影响

重庆特殊的地形地貌,造成特殊的生态环境。海拔高度和坡度对地表热度、湿度、干度、绿度均有影响。海拔是影响植被类型及分布的重要因素,海拔升高不仅影响着地表水热状况,同时还会在一定程度上影响人类活动类型和范围,进而直接或间接影响遥感生态指数 RSEI 的空间分布特征。

把海拔按梯度分为 9 个等级,分别为 $0 \text{ m} \sim 300 \text{ m}$, $300 \text{ m} \sim 600 \text{ m}$, $600 \text{ m} \sim 900 \text{ m}$, $900 \text{ m} \sim 1200 \text{ m}$, $1200 \text{ m} \sim 1500 \text{ m}$, $1500 \text{ m} \sim 1800 \text{ m}$, $1800 \text{ m} \sim 2100 \text{ m}$, $2100 \text{ m} \sim 2400 \text{ m}$, $2400 \text{ m} \sim 2800 \text{ m}$ 。分析 2000 年~2021 年遥感生态指数 RSEI 在每个梯度的变化。同理,将坡度分为 7 个等级, $0^\circ \sim 35^\circ$ 范围以 10° 为间隔划分, $35^\circ \sim 45^\circ$ 以 5° 为间隔划分,该划分方式更适合坡度相差较大的山地地区,分别为 $0^\circ \sim 5^\circ$, $5^\circ \sim 15^\circ$, $15^\circ \sim 25^\circ$, $25^\circ \sim 35^\circ$, $35^\circ \sim 40^\circ$, $40^\circ \sim 45^\circ$, $>45^\circ$,以期发现海拔与坡度对

重庆市生态和生态环境质量的影响规律。

3 结果分析

3.1 生态环境质量评价

通过对遥感生态指数模型的构建,在 Google earth engine 平台中计算得到重庆市 RSEI。为了更好地揭示过去 22 年重庆市生态环境的变化,参考徐涵秋^[14]提供的生态分类方法,把重庆市 RSEI 值分为 5 个等级,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”,RSEI 在 $0 \sim 0.2$ 范围内生态环境质量为“差”等级,在 $0.2 \sim 0.4$ 范围内为“较差”等级,在 $0.4 \sim 0.6$ 范围内为“一般”等级,在 $0.6 \sim 0.8$ 范围内为“良”等级,RSEI 在 $0.8 \sim 1$ 范围内为“优”等级,得到图 2 重庆市生态环境质量等级及其空间分布特征,图 2(a)~图 2(f)分别为 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2018 年、2021 年的重庆市生态环境质量等级及其空间分布特征图。

通过观察图 2 可以发现,重庆市的生态环境质量在这 20 多年里有大幅度提升,但仍具有空间上的差异,生态质量等级为“良”和“优”的地区大多为远离主城区的山地地区如渝东北和渝南,生态质量“差”和“较差”的地区集中在经济发达的主城区。2000 年(图 2(a))生态环境质量为“差”的区域在渝中区、江北区、沙坪坝区、九龙坡区和南岸区 5 区的交界地,处于重庆市经济中心,城市化水平高度发达,生态环境质量为“优”主要分布在城口县和巫溪县,该地区平均海拔在 1000 m ,植被茂盛,生态环境较少受到人为的破坏。2005 年(图 2(b))可以看出,重庆市生态环境质量相比 2000 年(图 2(a))大幅下降,渝西大部分(潼南区、合川区、铜梁区等)地区以及重庆北部延伸至东部(长寿区、涪陵区、万州区等)生态环境质量等级均为“较差”,这与 2000 年~2005 年以来我国经济社会发展取得巨大成就有关,重庆市在 1997 年成为直辖市,开始大力发展经济,城市的发展离不开占用绿地,这也对生态环境造成了一定程度的破坏。图 2 可以看出 2010 年~2021 年生态环境质量为“较差”的区域明显减少,合川区、武隆区、丰都县、南川区石柱土家族自治县等四个地区的生态环境质量有了大幅度提升。

近 20 多年来重庆地区 RSEI 的变化特征如下:
① RSEI 值总体呈上升趋势,尤其是重庆市东北部和南部地区,说明重庆在 2000 年~2005 年以来生态质量整体有好转,东北、东南方向好转趋势明显;

②低值 RSEI 像元主要分布在主城区,且在城市群地区呈现扩大趋势,这种变化特征与我国近年来在高速城镇化的发展下不断推进的西南城市地区尤其

是成渝地区生态文明建设和绿色发展道路有着密切的关系。

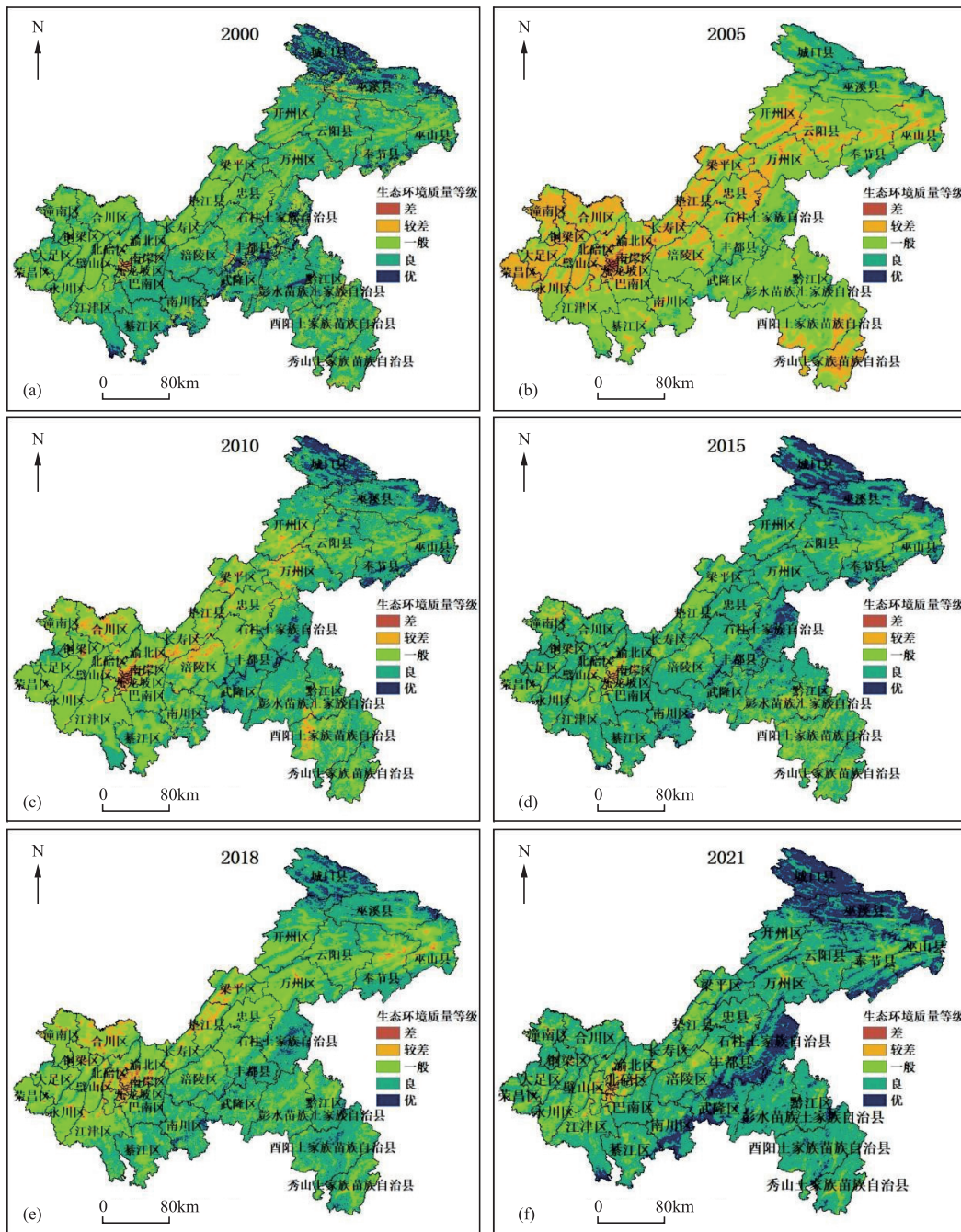


图 2 重庆市生态环境质量等级及其空间分布特征

Fig. 2 Ecological quality grade and its spatial distribution in Chongqing

为了定量的分析 RSEI 的变化特征,计算 2021 年~2000 年 5 个等级的变化面积及比例,得到表 2 重庆市生态环境质量等级与面积统计。由表 1 可知,从 2000 年~2021 年以来,遥感生态质量为“差”的区域生态质量面积下降了 66%，“较差”和“一般”的区域生态质量面积分别下降了

54%和 53%，生态质量为“优”、“良”的区域面积均有增长,特别是“优”的面积涨幅很大,增长了 130%。在过去的 22 年,“差”和“较差”的面积减少已达到 2 683 km²。生态质量“一般”的面积减少 1.35 万 km²,较 2000 年减少 50%以上。20 多年来,RSEI 均值主要集中在生态质量等级为良的

等级,从 RSEI 均值可以看出,2000 年~2021 年生态环境质量先下降后上升,整体呈生态环境质量向好的趋势。

为看出每种生态环境质量等级在不同年份之间的转移情况得到图 3:2000 年~2021 年重庆生态环

境质量等级转移矩阵桑基图,2000 年~2005 年,生态环境质量“一般”转为“较差”的面积最多,2005 年~2010 年“较差”一部分转移为“一般”一部分转移为“良”。2018 年~2019 年,“一般”部分向“良”转化,“良”在稳定的基础上部分向“优”转化。

表 2 重庆市生态环境质量等级与面积统计

Tab.2 Statistics of ecological quality grade and area of Chongqing

RSEI 等级	差/km ²	较差/km ²	一般/km ²	良/km ²	优/km ²	RSEI 均值
2000	454.86 (0.55%)	4 420.90 (5.35%)	25 285.80 (30.63%)	46 726.30(56.59%)	5 677.18 (6.88%)	0.63
2005	370.03 (0.45%)	26 992.00(32.69%)	45 297.60 (54.86%)	9 675.25 (11.72%)	230.14 (0.28%)	0.46
2010	490.73 (0.59%)	7 463.90 (9.04%)	35 327.90 (42.79%)	35 475.70 (42.97%)	3 806.75 (4.61%)	0.59
2015	79.19 (0.10%)	2 872.43 (3.48%)	17 291.00 (20.94%)	56 041.00 (67.87%)	6 281.40 (7.61%)	0.65
2018	288.80(0.35%)	5 706.28 (6.91%)	33 387.30 (40.44%)	40 728.90 (49.33%)	2 453.67 (2.97%)	0.60
2021	156.13 (0.19%)	2 036.04 (2.47%)	11 821.60 (14.32%)	55 478.30 (67.19%)	13 072.90 (15.83%)	0.69
Change	-298.73 (65.68%)	-2 384.86(53.95%)	-13 464.2 (53.25%)	8 752 (18.73%)	7 395.72 (130.27%)	0.06

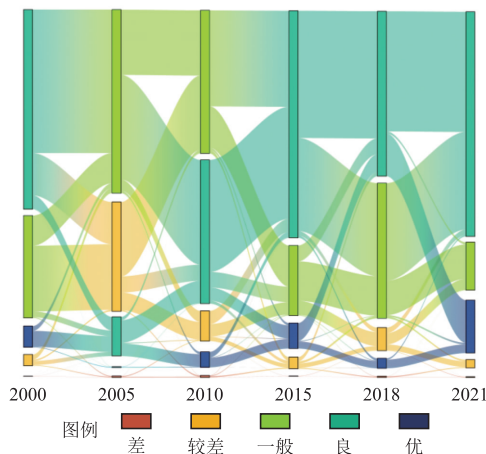


图 3 2000 年~2021 年重庆生态环境质量等级转移矩阵桑基图
Fig.3 Sankey diagram of ecological environment quality grade transfer matrix of Chongqing from 2000 to 2021

3.2 生态环境质量变化规律

为研究重庆市生态环境质量随时间变化的规律,将不同年份生态环境质量随时间的变化分为 5 个等级,即“极显著退化”、“显著退化”、“基本稳定”、“显著改善”、“极显著改善”,得到如图 4 重庆市 RSEI 随时间变化规律。图 4 中图 4(a)~图 4(f) 表示重庆市各个时间段生态环境质量的变化。图 4(a)为 2000 年~2005 年间生态环境质量的变化,大多数地区的生态环境都在显著退化和极显著退化,图 4(b)为 2005 年~2010 年间生态环境质量的变化,生态环境有了显著改善,重庆东部和南部地区有极显著改善,图 4(c)可以看出 2010 年~2015 年间生态环境质量大部分地区处于基本稳定和显著改善的状态,生态环境质量向好。图 4(d)可以看出 2015 年~2018 年间重庆西部地区生态环境质量存

在极显著退化和显著退化,中部和东部地区生态环境基本稳定,南部地区有显著改善和极显著改善。图 4(e)可以看出 2018 年~2021 年间生态环境质量有好转,重庆北部和东部地区生态环境质量有了显著改善,中部和南部的部分地区存在显著退化。图 4(f)可以看出 2000 年~2021 年重庆市主城区的生态环境质量在极显著退化,南部和西南部地区在显著退化,北部和东部地区基本稳定,因此在治理生态环境的时候应加大对主城区的管理力度,防止生态环境质量进一步退化。

3.3 RSEI 的海拔依赖性与坡度依赖性

3.3.1 RSEI 的海拔依赖性

为了进一步研究海拔和坡度对重庆市生态环境的影响规律,使用分区统计,将海拔和坡度分成不同的梯度与 RSEI 进行对比,得到图 5:2000 年~2021 年 RSEI 指数随海拔、坡度变化曲线及频率分布情况,图 5 左可知,2000 年及 2021 年不同等级的 RSEI 随海拔梯度的变化规律。不同年份 RSEI 随海拔上升呈现相似的变化趋势,同一年份间 RSEI 随海拔梯度变化具有不同的变化趋势。2000 年 RSEI 随海拔梯度升高的变化范围为 0.55~0.70,呈现先快速增加后缓慢增加,RSEI 最大值在海拔 2 100 m~2 400 m 范围内。2005 年 RSEI 的变化范围为 0.37~0.70,RSEI 整体呈增长趋势,在 2 400 m~2 800 m 有所下降,最大值在 2 100 m~2 400 m,曲线大部分在其他年份的下面,与其他年份相比 RSEI 明显偏小,这与表 1 中 2005 年 RSEI 年均值最小符合。2010 年 RSEI 的变化范围为 0.46~0.75,0 m~2 100 m RSEI 增长,2 100 m~2 800 m RSEI 减小,最大值在 1 800 m~2 100 m。2015 年、2018 年 RSEI 均在 0 m~2 400 m 持续增长,RSEI 在

海拔 2 100 m~2 400 m 达到最大值后有所降低,2015 年 RSEI 的变化范围为 0.57~0.82,2018 年 RSEI 的变化范围为 0.46~0.77。2021 年 RSEI 的变化范围为 0.56~0.76,曲线大部分在其他年份的上面,这与表 1 中 2021 年 RSEI 年均值最大符合,在海拔 0 m~2 100 m 逐渐增长,最大值在 1 800 m~2 100 m,2 100 m~2 800 m 快速降低。2000 年~2021 年 RSEI 指数随海拔变化曲线规律如下:①海拔多集中在 0 m~1 500 m 之间,300 m~600 m 是重庆市海拔分布最多的范围,这与重庆市多山地有关;②2010 年~2021 年 RSEI 均呈现随海拔增长而增加

的趋势,整体上,0 m~1 800 m 范围内 RSEI 缓慢增加,1 800 m~2 800 m 范围内开始减小,这可能是受人类活动的影响,海拔越低的区域人类活动越频繁,对生态环境会造成一定程度的破坏,随着海拔的升高,人类活动减少,生态环境质量逐渐好转,但是海拔升高到一定范围,由于气候因子如气温、降水等的影响占主要作用,生态质量有所下降;③整体上 RSEI 指数 2021>2015>2018>2010>2000>2005,2005 年 RSEI 随海拔变化最大,从 0.367 增长到 0.702,增长了 91.28%,2000 年 RSEI 随海拔变化最小,增长了 29.50%,增长相比其他年份最不明显。

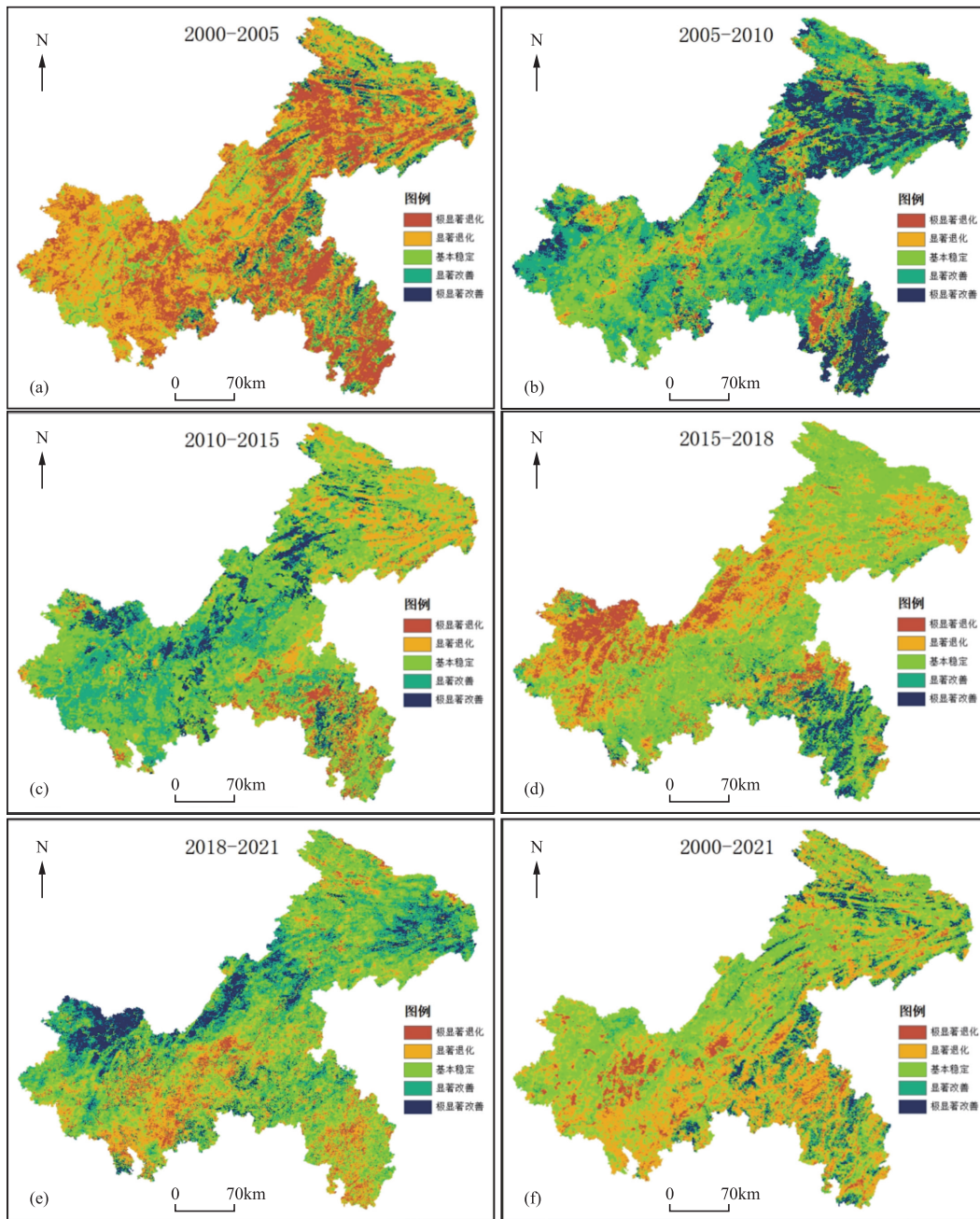


图 4 重庆市 RSEI 随时间变化特征规律

Fig. 4 Temporal variation of RSEI in Chongqing

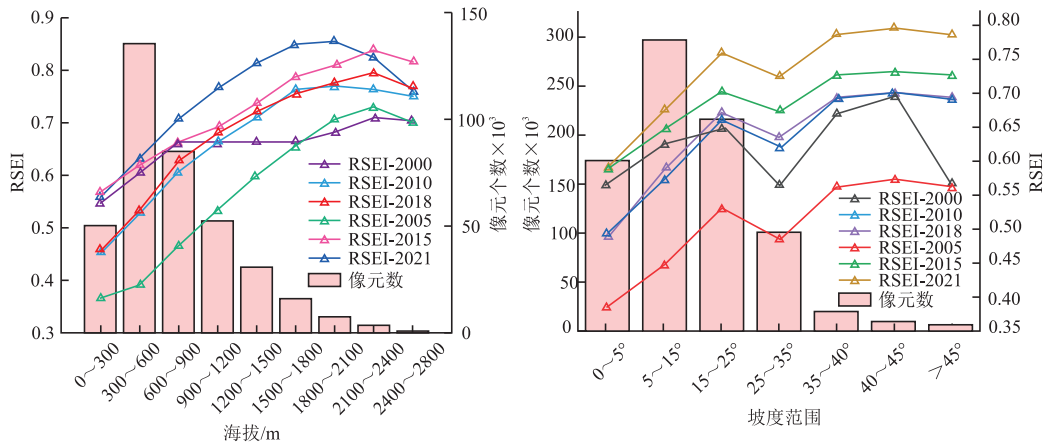


图5 2000年~2021年RSEI指数随海拔、坡度变化曲线及频率分布情况

Fig. 5 Variation curve and frequency distribution of RSEI index with altitude and slope from 2000 to 2021

3.3.2 RSEI的坡度依赖性

图5右可知,2000年RSEI随坡度的梯度升高的变化范围为0.56~0.70,2005年RSEI的变化范围为0.39~0.56,2010年RSEI的变化范围为0.49~0.70,2015年RSEI的变化范围为0.59~0.73,2018年RSEI的变化范围为0.48~0.70,2021年RSEI的变化范围为0.59~0.80。2000~2021年RSEI指数随坡度变化曲线规律如下:

1)不同年份RSEI随坡度上升呈现相似的变化趋势。整体上看,随着坡度的增加,RSEI也在增加,25°~35°范围RSEI有短暂下降,后继续增长,呈现先增加后下降再缓慢增加的规律,大于40°之后RSEI趋于平稳,RSEI最大值在坡度40°~45°。

2)0°~25°范围内RSEI受坡度的影响较大,并且坡度越陡的地方生态环境质量越好,25°~35°范围RSEI有很明显的下降趋势,这和重庆市起伏的地形有关,大于40°之后坡度对RSEI的影响较小。

3)整体上RSEI指数随坡度的梯度变化,2021>2015>2018>2010>2000>2005,2018年RSEI随海拔变化最大,增长了45.83%,2015年RSEI随海拔变化最小,增长了23.73%。

3.4 RSEI与气候因子的响应

为探究2000年~2021年重庆市RSEI与温度因子的响应关系,笔者使用年均气温、降水数据,得到图6重庆市海拔、RSEI与气候相关图。如图6(左)所示,气温随着海拔的升高呈下降趋势,这与海拔对气温的影响规律一致,降水随着海拔的升高呈先升高后下降的趋势,0m~1500m降水先显著上升后缓慢上升,1200m~1500m范围达到降水的最

大值,1500m~2400m降水开始下降,2400m~2800m降水随海拔上升有上升趋势,其气温和降水的变化趋势具有明显的山地气候特征,重庆建于川东平行岭谷,海拔的改变对重庆的气候产生较大的影响,一定程度上对局部环境、土壤含水量等指标产生影响,从而影响到植被的生长,植被指数NDVI在计算遥感生态指数RSEI中起主导作用,因此会影响到RSEI指数。

为了分析气候因子(年平均气温、年平均降水)对RSEI的作用机制,将2000年~2021年的RSEI指数的平均值,自然间断法分成8类,与近30年的年均气温和降水作比较,可以看出温度和RSEI呈负相关,温度越高,RSEI越低,这是因为地表温度LST对生态环境有副作用,地表温度越高,生态环境越差,随着降水的增加,RSEI指数逐渐上升,当年平均降水达到最大值时RSEI在0.66~0.73范围内,并没有达到RSEI的最大值,说明RSEI不仅仅受到气候一种因子的影响,地形地貌、坡度坡向、人口、土地利用类型、城镇建设、保护政策、产业结构等方面都在制约生态环境。

4 结论

笔者基于遥感数据处理技术和Google Earth Engine(GEE),以重庆市2000年~2021年的生态环境质量为切入点,探讨了我国西南山地城市生态环境质量及其影响因素,利用RSEI遥感生态环境指数,评价重庆市20多年生态环境质量的变化,以及RSEI的海拔依赖性和坡度依赖性,探究RSEI与气候因子的响应关系。主要结论如下:

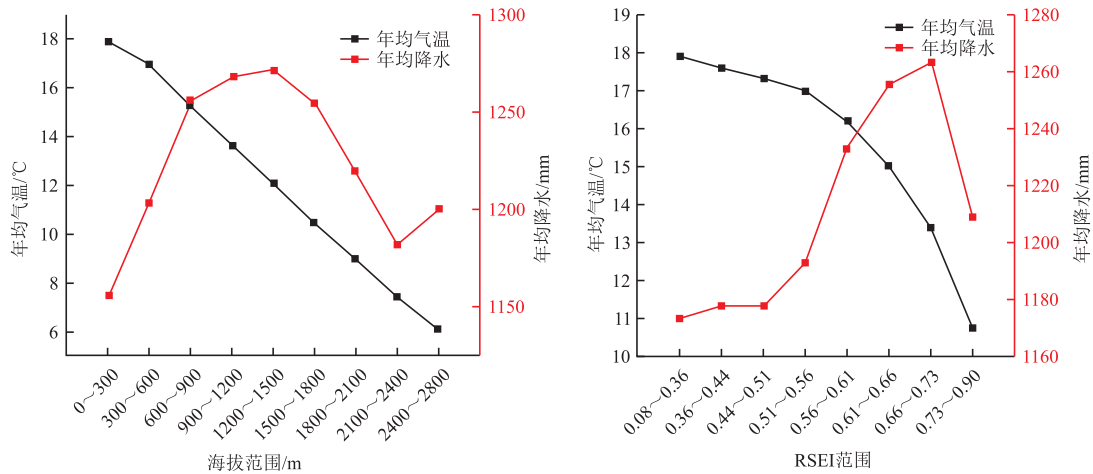


图6 重庆市海拔、RSEI与气候相关图

Fig. 6 Correlation map of elevation, RSEI and climate in Chongqing

1) 遥感生态指数 RSEI 总体呈上升趋势,生态质量为“差”的面积减少了 65.68%,生态质量为“优”的面积增加了 130.27%,生态环境有明显的好转,但仍存在区域差异,低值 RSEI 像元主要分布在主城区,且在城市群地区呈现扩大趋势,表明虽然生态环境质量整体好转,但主城区的生态环境保护仍然需要加强。

2) 从 RSEI 随海拔变化曲线可以看出,2010 年~2021 年 RSEI 均呈现随海拔增长而增加的趋势,整体上,0 m~1 800 m 范围内 RSEI 缓慢增加,1 800 m~2 800 m 范围内开始减小,相似的,RSEI 随坡度增加而增长,坡度 $>40^\circ$ 之后 RSEI 趋于平稳。

3) 从 RSEI 与气候因子的响应曲线可以看出,温度和 RSEI 呈负相关,温度越高,RSEI 越低,随着降水的增加,RSEI 指数逐渐上升,当 RSEI 在 0.66~0.73 时,随着降水的增加 RSEI 反而下降。

在对我国西南山地城市生态环境质量及其影响因素的讨论基础上,对西南山地城市的生态环境保护提出一些建议:

1) 建议相关部门完善生态环境相关的保护政策,着重对主城区进行生态质量的修护,可以通过增加主城区绿化面积、合理利用土地、设置生态保护红线、保护水资源等方式进行保护。

2) 在低海拔地区加大生态保护力度,中、高海拔地区坚持生态环境的基本维护。

3) 产业结构的发展要顺应生态环境,坚持绿色可持续发展的理念,减少高污染、高排放量的企业,加强对气候异常情况的监测。

参考文献:

- [1] 赵其国,黄国勤,马艳芹. 中国生态环境状况与生态文明建设[J]. 生态学报,2016,36(19):6328-6335.
ZHAO Q G, HUANG G Q, MA Y Q. Ecological environment status and ecological civilization construction in China [J]. Acta Ecologica Sinica,2016,36(19):6328-6335. (In Chinese)
- [2] 岳文泽,徐建华,徐丽华. 基于遥感影像的城市土地利用生态环境效应研究——以城市热环境和植被指数为例[J]. 生态学报,2006,26(5):1450-1460.
YUE W Z, XU J H, XU L H. Study on ecological environmental effects of urban land use based on remote sensing image: a case study of urban thermal environment and vegetation index [J]. Acta Ecologica Sinica, 2006,26(5):1450-1460. (In Chinese)
- [3] 方创琳. 中国新型城镇化高质量发展的规律性与重点方向[J]. 地理研究,2019,38(1):13-22.
FANG C L. Basic rules and key paths for high-quality development of the new urbanization in China[J]. Geographical Research,2019,38(1):13-22. (In Chinese)
- [4] 国家环保总局. 中华人民共和国环境保护行业标准(试行) HJ/T192-2006[S].
State Environmental Protection Administration. Environmental protection industry standard of the people's republic of China (Trial) HJ/T192-2006 [S]. (In Chinese)
- [5] 满卫东,刘明月,李晓燕,等. 1990-2015 年三江平原生态功能区生态功能状况评估[J]. 干旱区资源与环境,2018,32(2):136-141.
MAN W D, LIU M Y, LI X Y, et al. Assessment on

- the dynamics of eco-environmental statuses from 1990 to 2015 in the ecological function zone of Sanjiang Plain. [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2018, 32(2): 136-141. (In Chinese)
- [6] 王瑶, 宫辉力, 李小娟. 基于 GIS 的北京市生态环境质量监测与分析[J]. *国土资源遥感*, 2008, 20(1): 91-96. WANG Y, GONG H L, LI X J. The monitoring and analysis of ecological environment quality of Beijing based on GIS [J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2008, 20(1): 91-96. (In Chinese)
- [7] XU H. A new index for delineating built-up land features in satellite imagery[J]. *International journal of Remote Sensing*, 2008, 29(14): 4269-4276.
- [8] CACCAMO G, CHISHOLM L A, BRADSTOCK R A, et al. Assessing the sensitivity of MODIS to monitor drought in high biomass ecosystems[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(10): 2626-2639.
- [9] WILLIS K S. Remote sensing change detection for ecological monitoring in United States protected areas [J]. *Biological Conservation*, 2015, 182: 233-242.
- [10] DE ARAUJO BARBOSA C C, ATKINSON P M, DEARING J A. Remote sensing of ecosystem services: A systematic review[J]. *Ecological Indicators*, 2015, 52: 430-443.
- [11] ZHENG Z H, WU Z F, CHEN Y B, et al. Exploration of eco-environment and urbanization changes in coastal zones: A case study in China over the past 20 years[J]. *Ecological Indicators*, 2020, 119: 106847.
- [12] 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. XU H Q. A remote sensing evaluation index of regional ecological environment change[J]. *China Environmental Science*, 2013, 33(5): 889-897. (In Chinese)
- [13] HU X S, XU H Q. 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.
- [14] WEN X L, MING Y L, GAO Y G, et al. Dynamic monitoring and analysis of ecological quality of Pingtan comprehensive experimental zone, a new type of sea island city, based on RSEI[J]. *Sustainability*, 2019, 12(1): 21.
- [15] 刘栩位, 周启刚, 周浪, 等. 基于 RSEI 的三峡库区重庆段水土保持生态功能区生态环境质量动态监测[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(5): 278-286. LIU X W, ZHOU Q G, ZHOU L, et al. RSEI-based dynamic monitoring of ecological quality of the soil and water conservation functional area in the Chongqing section of the Three Gorges Reservoir Area[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, 28(5): 278-286. (In Chinese)
- [16] 杜春兰. 山地城市景观学研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2005. DU C L. Research of the discipline of mountain landscape [D]. Chongqing: Chongqing University, 2005. (In Chinese)
- [17] 朱林富, 谢世友, 杨华, 等. 基于 MODIS EVI 的重庆植被覆盖变化的地形效应[J]. *自然资源学报*, 2017, 32(12): 2023-2033. ZHU L F, XIE S Y, YANG H, et al. The response of dynamic change in vegetation coverage to topography in Chongqing based on MODIS EVI[J]. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(12): 2023-2033. (In Chinese)
- [18] 汪小钦, 王苗苗, 王绍强, 等. 基于可见光波段无人机遥感的植被信息提取[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(5): 152-157. WANG X Q, WANG M M, WANG S Q, et al. Extraction of vegetation information from visible unmanned aerial vehicle images[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(5): 152-157. (In Chinese)
- [19] 胡尔查, 王晓江, 铁牛, 等. 内蒙古大青山国家级自然保护区植被归一化指数时空变化及其与环境因子的关系[J]. *生态学报*, 2022, 42(14): 5945-5955. HU E C, WANG X J, TIE N, et al. Spatio-temporal variation of NDVI and influencing factors in the Daqing Mountain National Nature Reserve, Inner Mongolia [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(14): 5945-5955. (In Chinese)
- [20] 杜中曼, 马文明, 周青平, 等. 基于遥感技术的植被识别方法研究进展[J]. *生态科学*, 2022, 41(6): 222-229. DU Z M, MA W M, ZHOU Q P, et al. Research progress of vegetation recognition methods based on remote sensing technology [J]. *Ecological Science*, 2022, 41(6): 222-229. (In Chinese)
- [21] 刘月, 濮毅涵, 刘艳清, 等. 基于 Landsat 影像研究全球气候变化对武夷山国家公园垂直带谱上各植被群落的影响[J]. *生态科学*, 2022, 41(5): 152-162. LIU Y, PU Y H, LIU Y Q, et al. Study on the impact of global climate change on the communities of vegetation vertical zone spectrum in Wuyishan National

- Park based on Landsat imagery[J]. Ecological science, 2022, 41(5):152-162. (In Chinese)
- [22] 徐涵秋. 一种快速提取不透水面的新型遥感指数[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2008, 33(11): 1150-1153, 1211.
XU H Q. A new remote sensing index for fastly extracting impervious surface information[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2008, 33(11): 1150-1153, 1211. (In Chinese)
- [23] ROY P S, RIKIMARU A, MIYATAKE S. Tropical forest cover density mapping [J]. Tropical Ecology, 2002, 43(1): 39-47.
- [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] BAIG M H, ZHANG L F, SHUAI T, et al. Derivation of a tasseled cap transformation based on Landsat 8 at-satellite reflectance. Remote Sensing Letters, 2014, 5(5): 423-431.
- [26] TODD S W, HOFFER R M. Responses of spectral indices to variations in vegetation cover and soil background [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1998, 64(9): 915-921.

Long-term changes and evaluation of eco-environmental quality in mountainous cities in southwest China—Take Chongqing Municipality as an example

GOU Xiaojuan, LIU Rui, LI Gulin

(College of Geophysics, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: In order to study the eco-environmental quality of mountainous cities in southwest China, this paper takes Chongqing as an example and uses remote sensing technology and the Google Earth Engine(GEE) platform to construct RSEI (remote sensing ecological index), and evaluates the eco-environmental quality and its spatial-temporal heterogeneity during 2000-2021 in Chongqing. In order to explore the main influencing factors of eco-environmental quality in mountainous cities, four influencing factors, namely elevation, slope, temperature, and precipitation, were selected to obtain the allocation-dependence and slope dependence of RSEI and the response relationship between RSEI and climate factors. The results show that: ①The remote sensing ecological index RSEI showed an overall upward trend, and the area with "excellent" ecological quality increased by 130.27%, while the area with "poor" ecological quality decreased by 65.68%. The ecological environment improved, obviously, but there were still regional differences. Low RSEI pixels were mainly distributed in urban areas and showed an expanding trend in urban agglomeration. ②It can be seen from the change curve of RSEI with altitude that RSEI increases with the increase of altitude from 2010 to 2021. Overall, RSEI increases slowly within the range of 0 ~ 1800m and begins to decrease within the range of 1 800 m ~ 2 800 m. Similarly, RSEI increases with the slope increase. RSEI leveled off when the slope was greater than 40°. ③According to the response curve of RSEI and climate factors, temperature and RSEI are negatively correlated, and the higher the temperature, the lower the RSEI; With the increase of precipitation, RSEI index increased gradually. The research shows that the ecological environment quality of Chongqing has improved significantly since 2000 with the development of urbanization and the effective management of the ecological environment. Remote sensing technology can be used to monitor and evaluate the ecological environment quality in the area with perennial cloudy coverage in a long time series, and provide a reference for the ecological environment protection of mountainous cities in southwest China. The results show that the GEE platform can be used to monitor and evaluate the ecological environment quality in the southwest mountainous cities with cloud and high vegetation coverage. The ecological environment quality in Chongqing has improved significantly since 2000. The results of this study can provide exemplary management for the ecological environment protection of mountain cities in southwest China, carry out environmental management according to regional characteristics, and realize the coordinated development of the ecological environment and economy.

Keywords: Google Earth Engine; RSEI; southwest mountain city; chongqing; altitude; climate; conservation of ecology