

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.01.005.

汪士为, 吴伟. 近 31 年嘉陵江流域生态环境质量时空演变及驱动因子探测[J]. 水土保持研究, 2024, 31(1): 427-439.

Wang Shiwei, Wu Wei. Spatiotemporal Variation of Ecological Environmental Quality and Its Response to Different Driving Factors in Jialing River Basin in Recent 31 Years[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(1): 427-439.

近 31 年嘉陵江流域生态环境质量时空演变及 驱动因子探测

汪士为¹, 吴伟²

(1.湖北汽车工业学院, 湖北 十堰 442002; 2.武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072)

摘 要:[目的]城镇化建设的持续推进给嘉陵江流域生态环境带来的压力日益增加,多方位、客观、准确、快速测算区域生态环境质量是生态学研究的一个重点。[方法]利用 Landsat 数据和耦合的绿色度、湿度、干度和热度的遥感生态指数(remote sensing ecological index,RSEI),探究了 1990—2020 年不同时间段嘉陵江流域生态环境质量时空演变及其对人类活动、地形和气象变化的敏感性。[结果](1)生态环境质量整体呈变好趋势,RSEI 线性变化倾斜率为 0.0003/a。2003 年之前嘉陵江流域生态环境变化较为稳定,2003 年之后呈现先减小后增加的趋势。(2)50%以上区域的生态环境质量变化不明显。但 1990—1995 年陇南以北和达州以东地区生态环境质量呈退化趋势,平武部分地区呈改善趋势。1995—2000 年遂宁零星分布有轻微退化趋势的区域。2005—2010 年南充以南、广元以北等地区均呈轻微改善趋势。2010—2020 年迭部地区均以轻微退化趋势为主。(3)生态环境质量受到人口和国内生产总值的影响程度随时间变化呈下降趋势,土地利用、海拔、坡度和降水在 2015 年之前对生态环境质量影响较小,2015 年后对生态环境的影响呈增加趋势。气温和风速对生态环境影响力在 1995 年、2015 年均出现突增。(4)地形因子和气象与土地利用因子之间的交互作用对嘉陵江流域生态环境质量的影响均较大,且任何两种因子的交互作用都大于单个因子对嘉陵江流域生态环境质量的影响。[结论]国内生产总值和任何两个因子间的交互作用对嘉陵江流域生态环境质量的影响最小。研究区在 2015 年前生态环境质量受到人类活动的影响较大,但在 2015 年之后受到自然因素的影响逐渐增加,但总体上其生态环境质量有所改善,得益于近年来该市对生态环境的关注与投入。

关键词:生态环境质量;土地利用;地形因子;气象因子;嘉陵江流域

中图分类号:TP79, X87; X826;S7;Q948

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2024)01-0427-13

Spatiotemporal Variation of Ecological Environmental Quality and Its Response to Different Driving Factors in Jialing River Basin in Recent 31 Years

Wang Shiwei¹, Wu Wei²

(1.Hubei University of Automotive Technology, Shiyan, Hubei 442002, China; 2.State Key

Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract:[Objective] The continuous promotion of urbanization has brought increasing pressure on the ecological environment of the Jialing River Basin. The multi-directional, objective, accurate and rapid measurement of regional ecological environment quality is a key point of ecological research. [Methods] Landsat data and the remote sensing ecological index (RSEI) coupled with greenness, humidity, dryness and heat were used to explore the temporal and spatial evolution of the ecological environment quality of the Jialing River basin and its sensitivity to human activities, topography and meteorological changes in different time periods

收稿日期:2022-12-30

修回日期:2023-01-29

资助项目:国家自然科学基金“基于气象预报多维后处理的流域径流集合预报研究”(52079093)

第一作者:汪士为(1987—),男(满族),吉林长春人,博士,副教授,从事遥感生态。E-mail: wangshiwei_1987@qq.com

<http://stbcj.paperonce.org>

from 1990 to 2020. [Results] (1) The Jialing River Basin had been in a good trend in the past 31 years. The overall ecological environment quality had been improving, The slope rate of RSEI linear change was 0.000 3/a. Before 2003, the ecological environment change in the Jialing River Basin was relatively stable, and after 2003, it showed a trend of decreasing first and then increasing. (2) The change of ecological environment quality in more than 50% of the region was not obvious. However, from 1990 to 1995, the ecological environment quality in the north of Longnan and the east of Dazhou showed a degradation trend, while some areas in Pingwu showed an improvement trend. From 1995 to 2000, there was the scattered areas with slight degradation trend in Suining. From 2005 to 2010, areas south of Nanchong and north of Guangyuan showed a slight improvement trend. From 2010 to 2020, the Diebu region has a slight degradation trend. (3) The impact of population and GDP on the quality of the ecological environment had a downward trend over time. Land use, elevation, slope and precipitation had a small impact on the quality of the ecological environment before 2015, and the impact on the ecological environment had an increasing trend after 2015. The impact of temperature and wind speed on the ecological environment increased sharply in 1995 and 2015. (4) The interaction between topographic factors and meteorological and land use factors had a greater impact on the ecological environment quality of the Jialing River Basin, and the interaction of any two factors was greater than the impact of a single factor on the ecological environment quality of the Jialing River Basin. [Conclusion] The interaction between GDP and any two factors has the least impact on the ecological environment quality of the Jialing River Basin. The ecological environment quality of the study area was greatly affected by human activities before 2015, but the impact of natural factors gradually increased after 2015. However, the overall ecological environment quality of the study area had improved, benefiting from the city's attention and investment in the ecological environment in recent years.

Keywords: ecological environmental quality; land use; topographic factor ; climate factors; Jialing River Basin

生态环境质量是人类活动与自然环境共同作用的结果,与人类生存和社会经济发展密切相关^[1]。然而近 100 年以来,人类活动的持续增加导致大规模的生态系统扰动,这对全球碳循环有相当大的影响,也会加剧全球气候变化,从而导致各种各样的生态问题(如植被退化、生物多样性丧失以及极端气候事件增加)^[2-3]。嘉陵江作为长江上游重要的生态屏障和水源涵养地^[3],因布局了大量的采矿冶炼企业以及频繁出现的自然灾害等,使嘉陵江流域部分地区生态环境逐渐恶化^[4-5]。因此,我国推出了一系列生态修复工程,这使嘉陵江流域生态状况格局发生了巨大变化。厘清嘉陵江流域目前的生态环境质量时空状况及其演化的主要驱动因子,对认清嘉陵江流域生态环境现状及后期制定切实可靠的保护战略和制度至关重要。

随着 3S 技术的快速发展,卫星遥感已经成为动态监测生态环境要素和评估生态环境变化的有效技术手段^[6-7]。在遥感技术发展的基础上,我国环境保护部于 2006 年提出了以生物丰度指数、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为基础的生态指数(EI)^[8]。此后,很多学者利用多时相遥感数据通过构建反映生态环境的相关指数对我国

甚至全球的生态环境质量进行了评价^[9-11]。然而因 EI 获取指数困难和数据更新周期较长等原因,目前常用的生态环境质量评价模型多使用单一生态指数^[10]。如反映植被生长状况的归一化差异植被指数(NDVI)^[11]、增强型植被指数(EVI)^[12]和叶面积指数(LAI)^[13],反映城市生态热岛效应的地表温度^[14],反映区域干旱状况的各种干旱指数(标准化降水蒸散指数(SPEI)^[15]、温度植被干旱指数(TVDI)^[16])。虽然这些单一指数能够较好地反映生态环境的某一方面,但生态系统是一个特别复杂的系统,单一指数无法全面准确地描述生态环境^[17-18]。基于以上问题,有学者提出通过两个或多个度量的聚合指数来监测生态状态,从而实现生态环境的高精度监测^[19],也有一些学者使用层次分析法和压力—状态—响应(PSR)模型综合多个指标构建综合指标评估生态环境^[20]。但这些指标权重确定比较困难,且在计算过程中人为干预较多,因此无法精确地描述区域生态环境质量。因此,徐涵秋^[21]于 2013 年提出了一项包括代表气候和地表生物物理变量的遥感的生态指数(RSEI),该指数利用主成分分析耦合了表示地表植被覆盖和生长情况的绿色指数(NDVI)、表示土壤的湿度状况的湿

度(WET)指数、表示地表干旱程度的干燥度指数(NDBSI)和反映地表热度情况的热量指数(LST)。该指数弥补了EI,PSR 和聚合指数的人为主观权重设定、指标难获取性、结果无法进行可视化的不足,能对区域生态环境状况进行客观定量评价,成为区域生态环境质量监测和评估的新方法,比了EI,PSR 和聚合指数更有利于评估不同土地覆盖区域和不同地形的生态环境状况。如章程焱等^[5]基于 RSEI 指数研究发现嘉陵江下游生态环境质量显著退化趋势;Yang 等^[22]基于 RSEI 发现长江流域整体生态质量有所改善,但横断山脉区域有所下降,且地表温度是 RSEI 变化的主导因子;Zhou 等^[23]也基于 RSEI 指数发现 2000—2018 年太湖流域整体生态环境质量呈现快速下降阶段(2000—2010 年)和缓慢下降阶段(2010—2018 年)。以上研究基于 RSEI 均较好地反映了不同区域的生态环境质量状况,但通过查阅已有的文献发现目前对基于 RSEI 指数的嘉陵江流域生态环境质量监测和驱动机制的研究暂未检索到。而现存的嘉陵江流域生态监测的研究多基于单一指标进行研究。如胡孟珂^[7]基于 NDVI 探究了 2001—2020 年嘉陵江流域的植被覆盖度;王世杰等^[24]基于 SPEI 研究了近 60 年的嘉陵江流域干旱情况。因此亟需通过一种能够全面反映嘉陵江流域生态环境质量的指标探理清嘉陵江流域生态环境质量变化的驱动机制、空间分异特征。其次,嘉陵江流域生态环境质量监测是生态系统动态监测的一项长期性、经常性

的监测任务之一。

基于此,本文基于 Google Earth Engine(GEE)平台提供的 Landsat 数据构建 RSEI 指数,基于 RSEI 探究嘉陵江流域 1990—2020 年生态环境质量时空动态及自然因素和人为因子对其变化的驱动情况,旨在为未来嘉陵江流域生态环境保护战略与经济发展战略的协调发展提供理论依据。

1 研究区与研究方法

1.1 研究区概况

嘉陵江(102°—109°E,29°—34°N)是长江上游左岸的主要支流,发源于陕西秦岭山脉,向西南流经陕西、甘肃、四川和重庆并于重庆市的朝天门汇入长江干流,全长 1 120 km²,流域内面积为 15.98 万 km²(图 1)。嘉陵江是长江支流中流域面积最大、流量第二的大河,占整个长江流域面积的近 9%。嘉陵江流域具有丰富的地貌类型,上游段主要为山地地形,中游段为盆地和丘陵,下游段流经四川盆地东部平行峡谷区,形成了峡谷河流。嘉陵江流域落差海拔有 2 300 m^[7],大部分地区属于亚热带湿润季风气候。中下游地段冬季温暖多雾,上游则多霜雪风暴,春夏季节多春旱和初夏干旱天气。年均降水量 1 000 mm 以上,气温 1 月—4~10℃,7 月 14~32℃^[8-9]。本文使用的嘉陵江流域边界数据源于地理遥感生态网(<http://www.gisrs.cn/infofordata>)提供的全国二级流域边界数据。

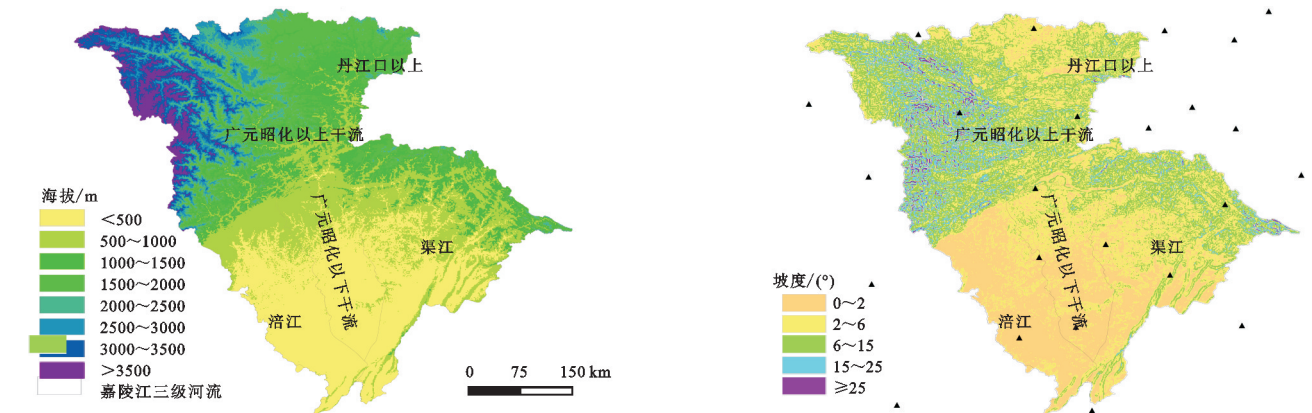


图 1 嘉陵江流域 DEM 和坡度空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of DEM and slope in Jialing River basin

1.2 数据来源与处理

(1) 遥感数据:遥感数据使用 Google Earth Engine(GEE)平台上提供的已经过了辐射定标、大气校正等预处理的 30 m 空间分辨率的陆地卫星 TM 和 OLI/TIRS 数据的地表反射率数据构建本文 RSEI 指数需要的归一化差异植被指数(NDVI)、缨帽变换的湿度分量(WET)、归一化差异不透水表面指数

(NDBSI)和地表温度(LST)。其中,NDVI 表示地表植被覆盖和生长情况,是反映区域生态环境质量的敏感因素;缨帽变换获取的湿度分量 WET 能够较好地反映地表植被和土壤的湿度状况;裸土和建筑用地均会造成地表“干化”,本研究利用建筑指数和裸土指数构建 NDBSI 用于表示地表干燥化;LST 是指示地表与大气之间物质能量交换的重要参数,用于反映地表

热度情况。本文通过多次对比试验选择每年的4—10月份的遥感数据作为RSEI计算的基础数据,因为该阶段为嘉陵江流域植被生长阶段,能更好地体现RSEI指数的特性。NDVI, NDBSI, WET和LST的计算公式见文章“1.3.1 遥感生态指数(RSEI)计算方法”章节。

(2) 气象数据(气温(TEM)、降水(PER)和风速(WIN)): 1990—2020年的气象数据源于中国气象数据网站(<http://data.cma.cn/data/cdcdetail/data-Code>)提供的气温、降水和风速的月数据。采用基于样条函数插值理论的专业气象插值软件ANUSPLINE,以DEM数据为协变量,对气温、降水和风速数据进行空间插值获得30 m的栅格数据。

(3) 高程数据(DEM): 30 m的DEM数据源于GEE平台提供的SRTM DEM产品。坡度数据(SLOPE)是基于DEM数据使用ArcGIS软件提供的Slope工具计算得到。

(4) 1990—2020年的土地利用数据(LUCC)、人口数据(POP)和国内生产总值(GDP)来源于中国科学院资源环境科学数据平台(<http://www.resdc.cn>)。土地利用数据包括草地、林地、耕地、建设用地、水域和未利用地。

1.3 研究方法

1.3.1 遥感生态指数(RSEI)计算方法 遥感生态指数(RSEI)从反映生态质量的众多自然因素中选择与人类生存相关的4个因素作为生态评价因素^[21],该指数利用主成分分析耦合了表示地表植被覆盖和生长情况的绿色指数(NDVI)、表示土壤的湿度状况的湿度(WET)指数、表示地表干旱程度的干燥度指数(NDBSI)和反映地表热度情况的热量指数(LST)。其中,NDVI和NDBSI指标可以反映生态环境对人类活动引起的土地覆盖变化的生态响应,LST和WET揭示了生态质量对代表气候变化的响应,4个生态指标综合起来能够直观地反映区域生态环境恶劣情况^[21]。4个指标的计算如下:

(1) 绿度指标 NDVI。归一化差异植被指数(NDVI)是应用最广泛的植被指数之一,许多生态学研究均证明了其有用性^[12-13]。因此,本文选择NDVI作为绿度指数,计算公式为(1):

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

式中: ρ_{nir} 为遥感图像的近红外波段; ρ_{red} 为红光波段。

(2) 热度指标 LST。热度指标由地表温度(LST)表示。虽然Landsat 8 TIRS传感器中有两个

热红外波段,但由于波段11的辐射校准问题,本文仅选择了波段10来反演LST^[18]。当然,对于TM,我们仍然得到了基于波段6的LST^[19]。首先,将数字(DN)值转换为传感器孔径处的光谱辐射亮度(L_λ),表示为:LST的计算公式见(2):

$$L_\lambda = G_{rescale} \times Q_{cal} + B_{rescale} \quad (2)$$

式中:其中 $G_{rescale}$ 是特定于频带的重新缩放增益因子; Q_{cal} 是量化的校准像素值(DN); $B_{rescale}$ 是不同于频带的重缩放偏置因子。传感器处光谱辐射亮度(L_λ)可使用公式(3)转换为传感器亮度温度下的有效辐射亮度:

$$T_\lambda = K_2 / \ln \frac{K_2}{L_\lambda} + 1 \quad (3)$$

式中: T_λ 是传感器亮度温度下的有效值; K_1 (TM波段6为607.76 W/(m²·sr·μm),TIR波段10为774.89 W/(m²·sr·μm)和 K_2 (TM波段4为260.56 K,TIR波段10为1321.08 K)分别是校准常数1,2。最后,使用 T_λ 获得LST,公式表示见(4):

$$LST = T_\lambda [1 + (\frac{\lambda_T}{\rho}) \ln \epsilon] \quad (4)$$

式中: λ 是发射辐射的波长(TM波段6为11.435 μm,TIR波段10为10.9 μm); ρ 为常数(1.438 × 10⁻² mK); ϵ 是表面发射率,可通过使用Sobrino模型的NDVI估算^[20]。

(3) 湿度指标 WET。对地表湿度信息较为敏感的缨帽变换湿度分量(TCW)已被证明对植被、水和土壤湿度条件较为敏感^[14]。因此,本文选择TCW作为湿度指数(WET),并且可以分别使用方程(5)和(6)来估计Landsat TM和Landsat 8的湿度指数^[23]:

$$WET_{tm} = 0.0315\rho_1 + 0.2012\rho_2 + 0.3102\rho_3 + 0.1594\rho_4 - 0.6806\rho_5 - 0.6109\rho_6 \quad (5)$$

$$WET_{oli} = 0.1511\rho_1 + 0.1973\rho_2 + 0.3283\rho_3 + 0.3407\rho_4 - 0.7117\rho_5 - 0.4559\rho_6 \quad (6)$$

式中: ρ_i ($i=1,2,3,\dots,6$)分别为TM和OLI传感器对应的蓝光波段、绿光波段、红光波段、近红外波段、短波红外波段1和短波红外波段2。

(4) 干度指标 NDBSI。由于建设用地和裸露土壤会对区域生态环境造成严重危害。因此,本文选择了归一化差异不透水表面指数(NDBSI)结合基于指数的建成指数(IFI)和土壤指数(BSI)表征研究区干湿度,其计算公式见(7—9):

$$NDBSI = (BSI + IFI) / 2 \quad (7)$$

$$BSI = [(S_1 + \rho_{red}) - (\rho_{blue} + \rho_{nir})] / [(S_1 + \rho_{red}) + (\rho_{blue} + \rho_{nir})] \quad (8)$$

$$IBI = \left\{ \frac{2S_1}{S_1 + \rho_{nir}} \left[\frac{\rho_{nir}}{\rho_{nir} + \rho_{red}} + \frac{\rho_{green}}{\rho_{green} + S_1} \right] \right\} / \frac{2S_1}{S_1 + \rho_{nir}} - \left\{ \left[\frac{\rho_{nir}}{\rho_{nir} + \rho_{red}} + \rho_{green} / (\rho_{green} + S_1) \right] \right\} \quad (9)$$

式中: $S_1, \rho_{red}, \rho_{green}, \rho_{nir}, \rho_{blue}$ 分别表示 TM 和 OLI 对应的短波红外、红光、绿光、近红外和蓝光波段

(5) 遥感生态指数构建 RSEI。通过主成分分析 (PCA) 将上述获得的 4 个成分指标进行耦合, 并使用第一个主成分 (PC1) 构建 RSEI, 其最大优点是综合指标的权重不是人为确定的, 而是根据每个指标对 PC1 的贡献自动客观地确定。因此, 在计算中避免了由于权重设置而导致的可能的偏差, 该权重设置因个人和方法而异, 这大大提高了结果的客观性和可信度。由于上述 4 个因素的维度不均匀, 如果直接使用这些因素来计算 PCA, 每个指标的权重都会不平衡。因此, 在预处理后进行主成分分析 (PCA) 之前, 需要对这 4 个指标进行归一化以实现单位统一。采用 PCA 方法将 NDVI, LST, WET, NDBSI 的信息集中到第一主成分上, 其是根据各指标在主成分的贡献度和自身的性质确定权重, 减少了人为赋值的误差。为了避免水体对主成分载荷的影响和指标量纲不统一对权重的影响, 在进行主成分之前进行了如下处理: (1) 使用改进的归一化差异水体指数 (MDNWI) 掩膜去除水体。(2) 由于这 4 个指标不一致性, 在预处理后进行主成分分析 (PCA) 之前对这 4 个指标进行归一化以实现单位统一^[21]。

MNDWI 计算公式见 (10):

$$MNDWI = (\rho_{green} - \rho_{mir}) / (\rho_{green} + \rho_{mir}) \quad (10)$$

式中: ρ_{green}, ρ_{mir} 分别表示 TM 和 TIR 对应的绿光波段和中红外波段。

指标归一化公式见 (11):

$$NI_i = (I_i - I_{min}) / (I_{max} - I_{min}) \quad (11)$$

式中: NI_i 为个指标归一化结果; I_i 为各指标在第 i 像元的值; I_{max} 和 I_{min} 分别为各指标最小值和最大值。

RSEI 计算公式见 (12)、(13):

$$RSEI_0 = 1 - PC1[f(NDVI, WET, LST, NDBSI)] \quad (12)$$

$$RSEI = (RSEI_0 - RSEI_{0min}) / (RSEI_{0max} - RSEI_{0min}) \quad (13)$$

式中: PC1 为 4 个指标归一化后指标通过第一主成分分析的结果, 为了方便分析, 对其进行正负值转置。RSEI₀ 为转置后结果, 4 个指标分别参与徐涵秋等^[21]的研究成果, 具体计算公式见文献^[21]。RSEI_{0max} 和 RSEI_{0min} 分别为 RSEI₀ 最大值和最小值。

1.3.2 RSEI 变化趋势分析 采用 Sen 趋势法探究 1990—2020 年嘉陵江流域 RSEI 变化趋势和变化速率。Sen 斜率的计算公式见 (14)^[11]:

$$\beta = \text{Median} \left(\frac{x_j - x_i}{j - i} \right), \forall j > i \quad (14)$$

式中: β 为 RSEI 变化趋势; Median 为取中值函数; 当 $\beta > 0$ 时, RSEI 呈增加趋势; $\beta < 0$ 时, RSEI 呈减小趋势。

1.3.3 RSEI 对不同驱动因子的响应—地理探测器

地理探测器是将自变量空间分布与潜在因素分布进行比较, 适用于测量空间分层非均质性程度的空间分析方法^[25]。本文利用地理探测器分析嘉陵江流域 RSEI 的空间分布特性, 以及探测不同因子与 RSEI 的相关性程度, 用 q 值解释这个程度。公式见 (15):

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \delta_h^2}{N \delta^2} \quad (15)$$

式中: q 是影响因子对 RSEI 时空变化的解释力; h 是不同驱动因子的分类或分区数据; L 为影响因子的样本数量; N_h 和 N 分别是 h 和整个区域的单元数; δ_h^2 和 δ^2 是 h 和整个区域的方差。 q 值越大, 代表该因子对 RSEI 的影响程度越大。

2 结果与分析

2.1 各指标主成分分析

本文通过对 1990 年、2000 年、2010 年、2020 年的 4 个指标进行主成分分析, 得到结果见表 1。从表 1 可以看出 4 期影像各指标的第一主成分的贡献率分别为 97.588%, 97.658%, 98.327% 和 98.003%, 表明第一主成分包含了 4 个指标的大部分信息, 可以使用第一主成分构建 RSEI 指数。其中, 代表植被覆盖度的 NDVI 和代表地表湿度的 WET 在第一主成分上的载荷均为正, 表明 NDVI 和 WET 对 RSEI 具有正向作用, 而代表地表温度的 LST 和代表建筑 and 土地硬化程度的 NDBSI 在第一主成分的载荷均为负, 表明二者对 RSEI 具有负向作用, 而其主成分 (P2—P4) 则无明显规律可循, 基本不能揭示嘉陵江流域生态环境质量状况。这一结果与王丽霞^[26]、魏雨涵^[27]和 Huang^[28]等的研究结论一致。因而本文后续研究将采用第一主成分的值来构建嘉陵江流域的 RSEI 模型。其中, 第一主成分值越高, 代表生态环境质量越好, 反之亦然。

2.2 嘉陵江流域 RSEI 的空间分布特征

本文基于文献^[20], 将 RSEI 划分为 $RSEI < 0.2$ (差), $0.2 \leq RSEI < 0.4$ (较差), $0.4 \leq RSEI < 0.6$ (中

等), $0.6\leq RSEI<0.8$ (良好)和 $RSEI\geq 0.8$ (优)5 个等级。从嘉陵江流域 RSEI 年际变化及 Mann-Kendall (M-K)检验曲线可以发现(图 2),1990—2020 年嘉陵江流域 RSEI 值呈增加趋势,线性变化倾斜率为 0.000 3/a,说明嘉陵江流域近 31 年生态环境质量整体呈变好趋势。其中 2006 年和 2011 年分别是该地区近 31 年 RSEI 最小的两个年份,RSEI 值分别为 0.628,0.706,均属于良好等级。2002 年和 2004 年分别是嘉陵江流域近 31 年 RSEI 值最高的两个年份,RSEI 值分别为 0.873,0.871,均属于优等级。由 UF 曲线可以看出 1992 年和 2010—2016 年嘉陵江流域 RSEI 为减小趋势,其他年份均为上升趋势。在 2003 之前的年份 UF 和 UB 曲线相交年份较多,但在 2003 年之后的年份 UF 和 UB 曲线无相交情况,因此可以说明 2003 年是嘉陵江 RSEI 出现突变的年份。从 UF 和 UB 的曲线来看在 2003 年之前 RSEI 基本为较为稳定对的浮动状态,但在 2003 年之后 RSEI 呈现先减小后增加的趋势。

表 1 嘉陵江流域 1990 年、2000 年、2010 年、2020 年各指标主成分结果

Table 1 Principal component results of indicators of Jialing River basin in 1990, 2000, 2010 and 2020					
年份	参数	第一主成分	第二主成分	第三主成分	第四主成分
1990	NDBSI	-0.423	-0.005	-0.212	-0.881
	NDVI	0.660	0.669	-0.222	0.259
	LST	-0.439	-0.340	-0.735	0.389
	WET	0.439	-0.661	0.605	0.069
	特征值	1.313	0.025	0.005	0.003
	特征值贡献率/%	97.588	1.829	0.362	0.221
2000	NDBSI	-0.366	0.038	-0.533	-0.762
	NDVI	0.650	0.676	0.326	0.118
	LST	-0.534	-0.380	-0.486	0.578
	WET	0.398	0.630	0.611	-0.268
	特征值	1.482	0.023	0.008	0.004
	特征值贡献率/%	97.658	1.546	0.529	0.267
2010	NDBSI	-0.267	0.200	0.242	0.911
	NDVI	0.575	0.617	-0.510	-0.169
	LST	-0.592	-0.051	0.722	-0.354
	WET	0.498	-0.759	-0.400	0.127
	特征值	1.705	0.022	0.005	0.001
	特征值贡献率/%	98.327	1.283	0.316	0.075
2020	NDBSI	-0.228	0.086	-0.510	0.825
	NDVI	0.693	0.555	-0.236	-0.395
	LST	-0.597	-0.233	0.708	0.297
	WET	0.334	0.794	-0.428	-0.274
	特征值	1.464	0.023	0.004	0.002
	特征值贡献率/%	98.003	1.541	0.298	0.158

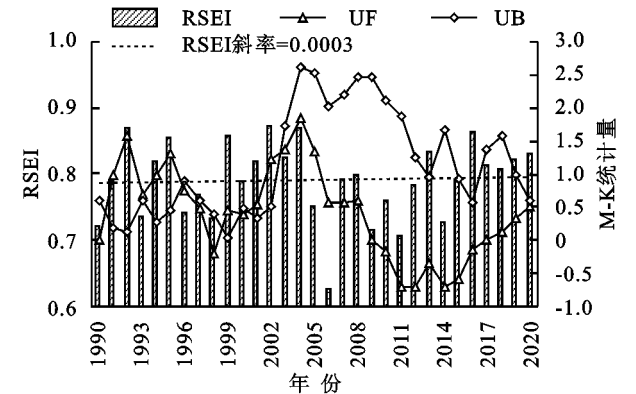


图 2 嘉陵江流域 RSEI 时序曲线和 Mann-Kendall (M-K) 检验曲线

Fig. 2 RSEI time series curve and mann kendall (M-K) inspection curve of Jialing River basin

从嘉陵江流域 RSEI 的空间分布来看(图 3,表 2),除 2005 年、2010 年生态环境质量以中等等级为主,其他年份的生态环境质量均以良好和优等级为主,这表明嘉陵江生态环境质量较好,但其空间分布异质性较大。其中,1990 年嘉陵江大部分面积 RSEI 处于良好等级,共 130 268.7 km²,占嘉陵江流域总面积(不含水体)的 78.11%;中等等级的 RSEI 零星分布在整个区域,占总面积的 13.51%,仅有 0.25%区域为较差等级,分布在广元昭化以下干流区域的南部地区。1995 年除陇南西部的生态环境质量为中等等级,其他区域的生态环境质量均较好,为优等等级。2000 年嘉陵江流域的生态环境质量占良好和优等等级的比例相近,但总体表现为海拔较高的北部低于海拔较低的中、南部;嘉陵江流域 2005 年的生态环境质量较 2000 年之前明显退化,从以良好和优等的生态环境质量为主转换为中等等级。2010 年较 2005 年生态环境质量有所改善,但较 2000 年之前仍较差。2015 年、2020 年的生态环境得到改善,较 2010 年相比优等面积比例分别增加了 48.90%和 40.22%。总体而言,除 2005 年、2010 年外,研究区内大部分地区为良好和优等等级,流域生态环境整体呈现为先改善、变差和改善的过程。

2.3 长江流域 RSEI 演变趋势

进一步分析 1990—1995 年、1995—2000 年、2000—2005 年、2005—2010 年、2010—2015 年、2015—2020 年嘉陵江流域 RSEI 变化趋势(图 4,图 5),发现 30 年间嘉陵江流域 50%以上的区域的生态环境质量为变化不明显,但其变化趋势存在显著的时空差异性。1990—1995 年 1.12%的区域表现为退化趋势,零星分布在达州地区,12.84%的区域为轻微退化趋势,集中在陇南以北和达州以东地区,仅有 1.51%的区域呈显著改善趋势,集中在平武地区。1995—2000 年的 71.57%的区域表现为

变化不明显趋势,14.65%的区域表现为轻微退化趋势。2000—2005 年 69.31%的区域表现为轻微改善趋势,但在遂宁等地区仍零星分布有轻微退化趋势的区域。2005—2010 年在南充以南、广元以北等地区

均呈轻微改善趋势,但在其他区域均有部分像元上为轻微退化趋势,其中退化趋势的占 12.98%。2010—2020 年嘉陵江大部分区域生态环境变化不明显,但在迭部地区均以轻微退化趋势为主。

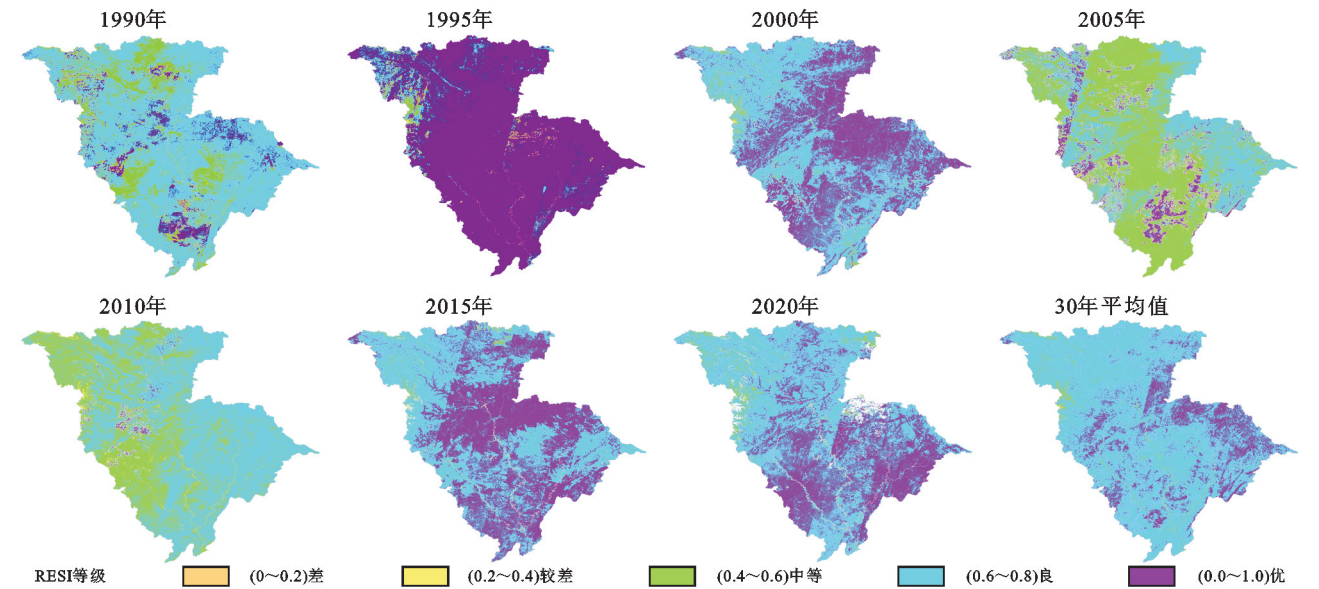


图 3 嘉陵江流域 1990 年、2000 年、2010 年、2020 年、30 a RSEI 空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of RSEI in Jialing River basin in 1990,2000,2010,2020, 30 a

表 2 不同年份 RSEI 各等级统计

Table 2 Statistical chart of rsei levels in different years

RSEI	1990 年		1995 年		2000 年		2005 年		2010 年		2015 年		2020 年	
等级	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%
差	5.2	0.00	10.7	0.01	10.5	0.01	4.6	0.00	40.70	0.02	46.2	0.03	77.9	0.05
较差	416.4	0.25	40.6	0.02	159.4	0.10	204.3	0.12	1387.7	0.83	724.3	0.43	586.3	0.35
中等	22525.2	13.51	3516.9	2.11	4562.9	2.74	91745.8	55.01	61156.3	36.67	2678.2	1.61	4495.5	2.70
良	130268.7	78.11	16968.7	10.17	82323.1	49.36	56935.9	34.14	101888.4	61.09	79474.3	47.65	92230.9	55.30
优	13560.7	8.13	146239.3	87.69	79720.2	47.80	17885.6	10.72	2303.0	1.38	83853.3	50.28	69385.3	41.60

2.4 嘉陵江流域土地利用转移矩阵

为进一步分析人类活动对嘉陵江流域 RSEI 的影响,我们基于目前提供的土地利用类型产品分析了 1990—2020 年嘉陵江流域土地利用转移情况(图 5,图 6),发现 1990—1995 年有 724.43 km²的草地转换为林地,有 152.98 km²的草地转为耕地,其他转换类型主要为林地转为草地和耕地、耕地转为草地、林地和建设用地。但总体表现为林地面积和建设用地面积增加,草地和耕地面积减少。1995—2000 年主要转移类型为林地转为草地,转换了 855.99 km²。其而耕地面积的减少主要得益于增加的建设用地、草地和林地,水域和未利用地基本没有变化。2000—2005 年的主要转移类型为未利用地转为建设用地(转移面积 436.71 km²),耕地转为建设用地的面积为 165.38 km²,建设用地面积仍为持续增长趋势,其次在川陕甘地区的草地和林地面积也有些许增加。2005—2015 年草地面积

减少了 1.72%,林地和耕地面积分别增加了 0.42%和 1.8%。2015—2020 年虽然林地和建设用地面积分别增加了,但耕地和未利用地面积减少了,从而使草地面积增加。

2.5 RSEI 对不同驱动因子的响应

通常认为人类活动(如土地利用变化、人口和 GDP)、地形(如坡度、海拔)和气候因子(气温、降水和风速)的协同或单独作用导致生态环境质量发生变化。因此,本文基于地理探测器的因子探测器和交互探测器分析了不同年份人为活动、地形和气候因子对嘉陵江流域生态环境质量驱动机制。从 RSEI 的多年均值的因子探测结果可知(图 7),人口(POP)的和 GDP 与嘉陵江流域的 RSEI 的关系最敏感,q 值分别为 0.279,0.283,其次分别为气温(TEM,q 值为 0.150)和海拔(DEM,q 值为 0.117)。而土地利用(LUCC,q 值为 0.043,)和坡度(SLOPE,q 值为 0.052)对嘉陵江流域的 RSEI 的变化的驱动作用最

小,其次为风速(WIN, q 值为 0.064)和降水量(PER, q 值为 0.079)。通过不同因子交互探测结果我们发现 $DEM \cap TEM(0.521)$ 和 $DEM \cap WIN(0.519)$ 的交互作用对 RSEI 的影响最大,影响因子大于 0.5。其次, $LUC \cap PER(0.408)$ 、 $PER \cap WIN(0.402)$ 、 $SLOPE \cap TEM(0.405)$ 、 $SLOPE \cap POP(0.45)$ 、 $SLOPE \cap DEM(0.494)$

的交互作用对 RSEI 的影响因子均大于 0.4(表 3)。可以发现地形因子和其他因子之间的交互作用对 RSEI 的影响均较大,且任何两种因子的交互作用都大于单个因子对嘉陵江流域生态环境质量的影响。而 GDP 和任何两个因子之间的交互作用对 RSEI 的影响最小。

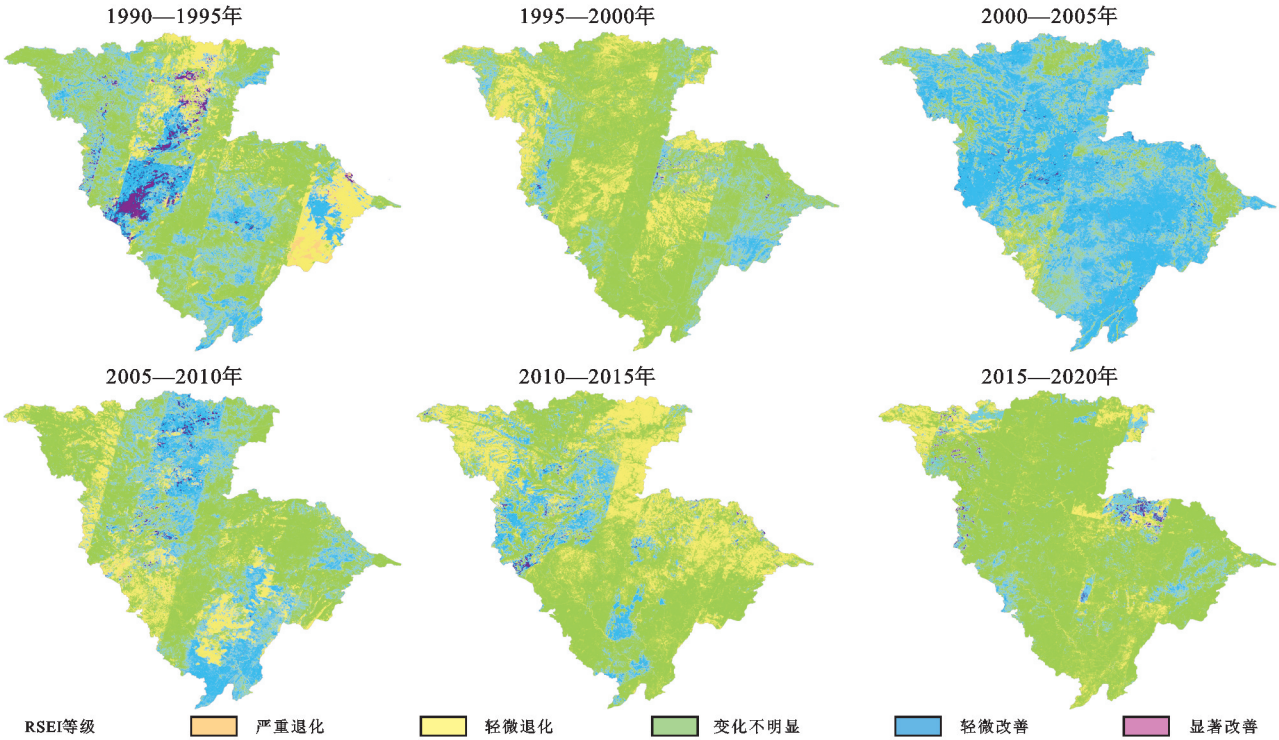


图 4 嘉陵江流域不同阶段 RSEI 变化趋势

Fig. 4 RSEI change trend and statistics in different stages of Jialing River basin

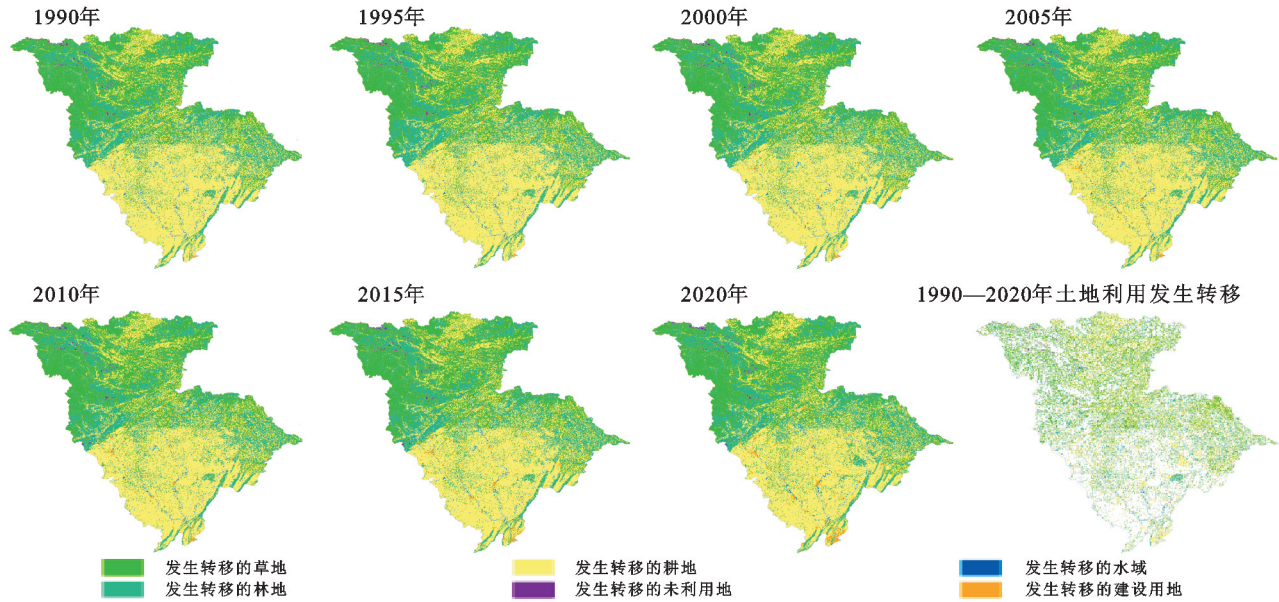


图 5 嘉陵江流域土地利用分布图和土地利用转移

Fig. 5 Land use distribution map and land use transfer map of Jialing River basin

通过分析不同年份 RSEI 受到不同因子的敏感性情况(图 8),发现 GDP 和 POP 对 1990—2020 年的 RSEI 的 q 决定力呈下降趋势,LUCC 和 SLOPE 在 2010 年之

前对 RSEI 的 q 值较小且变化稳定,而在 2010—2020 年 q 值均呈增加趋势,但增加幅度较小。DEM 对 RSEI 影响的 q 值在 2010 年也较小且变化稳定,但在 2015 年大

幅度增加,2020 年呈略微下降趋势,但 q 值仍高于 2010 年之前。PER 在 2010 年之前对 RSEI 的 q 值均在 0.01 以下,但在 2015 年突增至 0.408,2020 年有所下降,但 q

值仍远远高于 2010 年之前的 q 值。TEM 和 WIN 对 RSEI 影响的 q 值在 1995 年、2015 年均发生了显著的突增,但随后均有所下降。

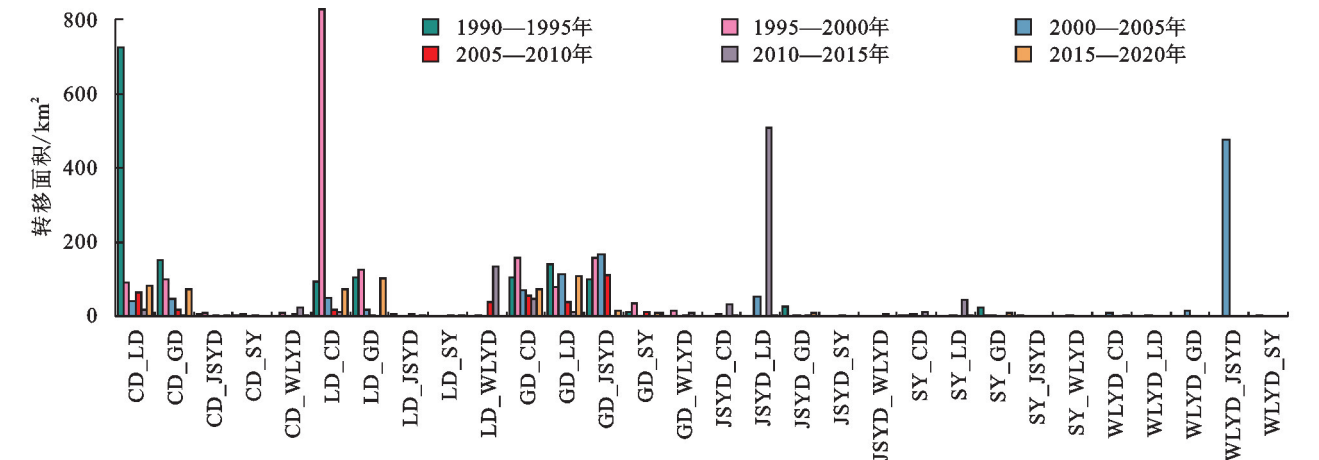


图 6 不同年份嘉陵江流域土地利用转移统计图

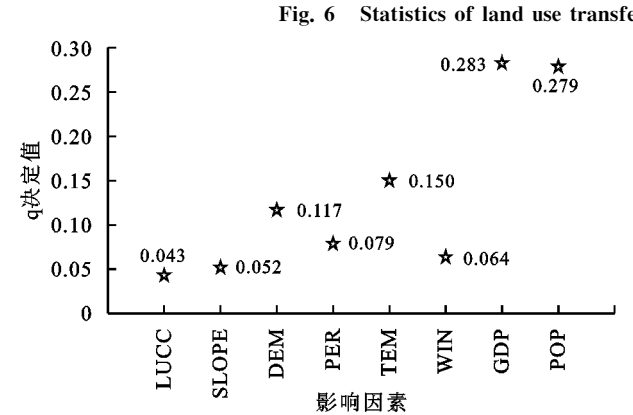


图 7 不同因子对年均 RSEI 变化的 q 驱动力值分布
Fig. 7 Distribution of q driving force values of different factors on the annual average RSEI variation

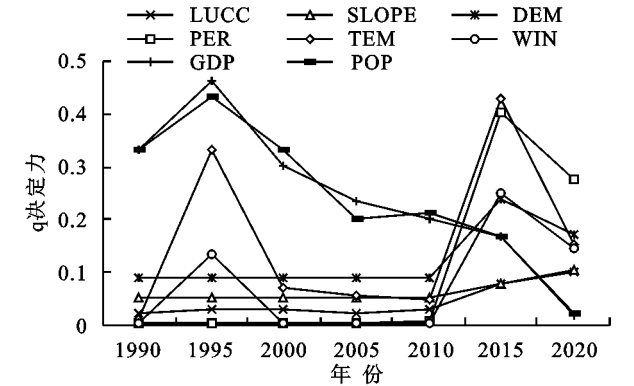


图 8 不同年份 RSEI 对不同因子的 q 驱动力值分布
Fig. 8 Distribution of q driving force values of RSEI for different factors in different years

表 3 嘉陵江流域 RSEI 对不同因子交互作用的敏感性

参数	LUCC	PER	TEM	WIN	GDP	POP	DEM	SLOPE
LUCC	0.089							
PER	0.408	0.127						
TEM	0.357	0.319	0.105					
WIN	0.274	0.402	0.261	0.046				
GDP	0.190	0.268	0.192	0.131	0.119			
POP	0.258	0.213	0.259	0.217	0.317	0.112		
DEM	0.353	0.363	0.521	0.519	0.363	0.178	0.137	
SLOPE	0.214	0.381	0.405	0.220	0.318	0.450	0.494	0.027

3 讨论

3.1 嘉陵江流域生态环境质量动态变化

嘉陵江流域作为长江上游重要的地理生态区域,其生态环境保护与高质量发展已上升为国家战略^[26]。其中气候变化和人类活动对该区域造成的影响最为突出,如据气象报告在 2006 年夏季嘉陵江流

域的川渝地区发生了极大的干旱事件,降水量较其他年份显著减少,对该地区的植被生长和社会经济发展产生了严重的不利影响^[28];在 2011 年嘉陵江流域遭遇了 3 次大暴雨,暴雨引起了严重的水土流失、土壤盐碱化、滑坡等影响该区域生态环境质量的自然灾害^[29]。因此,我国政府于 1999 年在嘉陵江流域的川陕甘实施了“退耕还林、荒山造林”等生态环境恢复

项目改善嘉陵江流域生态环境质量。在生态保护和环境恢复实施下一些地区生态环境呈现出恢复状态,然而目前关于嘉陵江流域生态环境质量变化的主导因子的研究还较少。因此,本文通过分析嘉陵江流域1990—2020年的RSEI时空动态,发现1990—2020年嘉陵江流域生态环境质量整体呈上升趋势。其中,2006年和2011年嘉陵江流域的生态环境质量较其他年份显著退化,这一结果与极端气象事件一致。同样,胡孟珂等通过研究气候对嘉陵江流域的植被覆盖度变化时也发现在2006年和2011年植被覆盖度发生突降。其次,我们发现嘉陵江流域1999年后年的RSEI较1996—1998年的RSEI得到了大幅度提升,但在2003年之前RSEI基本为较为稳定对的浮动状态,2003年之后RSEI呈现先减小后增加的趋势,发生这种突变的可能原因主要是虽然嘉陵江流域在1999年之后实施了一系列生态保护和修复的项目。

我们进一步分析了不同阶段嘉陵江流域RSEI空间变化趋势,发现30年间嘉陵江流域50%以上的区域的生态环境质量为变化不明显,但其变化趋势存在显著的时空差异性。其中煤矿开采区集中区(华蓥山地区和大巴山地区)、铁矿则集中区(涪江流域)的生态环境呈退化趋势最明显。有研究发现在2000年后嘉陵江开采业快速发展,因为嘉陵江流域很多区域开采后期生态恢复措施不完善,如矿物弃渣随意丢弃、废弃船舶滩涂维修不做任何污染防治措施、随意砍林造路等。这使得在嘉陵江经济快速发展的期间这些区域的生态环境质量也呈现大面积的退化趋势。其次,在2000年之后在城镇化推进下,城市建设和扩张在进一步加速,为增加新的居住用地或修建工业设施。其次,因为当地居民生态意识浅薄,存在土地利用不当,盲目破坏生态环境,进而导致大面积的植被区域被破坏,尤其在海拔较高的区域和川蜀等经济发展迅速的地区表现尤为显著^[8-12]。针对以上问题,嘉陵江上游流域很多地区实施了生态环境保护条例实现嘉陵江流域生态环境的可持续发展,据统计数据在2015年之后随着生态保护理念和政府的宏观调控下,人们保护生态环境的意识增加(如嘉陵江西南涌两岸的养殖业实施的限期清理废水、农村集中养殖并统一处理养殖废水、农家肥有效利用等),使生态环境质量在2015—2020年有所改善。虽然在2015年及之后,嘉陵江上游流域生态环境质量得到很好的改善,但相关部门仍需继续贯彻落实相关规定,尽量减少人类活动对生态脆弱区生态环境的影响。

3.2 嘉陵江流域生态环境质量的驱动因子

为进一步分析人类活动和气象因素对嘉陵江流

域RSEI的影响,我们基于目前提供的土地利用类型产品分析了1990—2020年嘉陵江流域土地利用转移情况,发现1990—1995年林地面积和建设用地面积增加,草地和耕地面积减少。1995—2000年主要转移类型为林地转为草地,耕地面积的减少主要得益于增加的建设用地、草地和林地,水域和未利用地基本没有变化。2000—2005年的主要转移类型为未利用地转为建设用地,建设用地面积仍为持续增长趋势。2005—2015年草地面积减少、林地和耕地面积分别增加。2015—2020年虽然林地和建设用地面积增加,但耕地和未利用地面积减少从而使草地面积增加。通过分析发现土地利用转移主要与人口的快速增加、城市扩张和1999年开始的将坡耕地退耕还林还草、宜林荒山荒地造林的退耕还林(还草)政策有关。有研究发现因为特定生态环境变化和人类活动导致部分草地转为耕地、林地和其他土地,由于人口快速增长和三北防护林体系工程的实施,建设用地的的发展,导致许多草地遭到破坏,并且长期过度放牧加上气候变化和啮齿动物破坏的影响,嘉陵江流域天然草地退化严重,将不可避免地导致该区域荒漠化加剧。RSEI变化是一个周期性、持续性的动态过程,除了受到人类活动的影响,气候变化和地形也是RSEI变化的另一驱动因素。因此,本文综合前人研究选择了气温、降水、风速、坡度、坡向、GDP、人口数据和土地利用数据基于地理探测器探究了不同阶段以上因素对RSEI变化的贡献情况。发现在主导因子方面嘉陵江流域生态环境质量前期主要受到GDP和POP的影响程度较大,但随着时间的变化受到GDP和POP的影响程度呈下降趋势,但TEM,WIN,LUCC,DEM,SLOPE和PER在2015年之前对嘉陵江生态环境质量影响较小,2015年后对生态环境质量的影响程度呈增加趋势。因此可以发现嘉陵江流域生态环境质量在前期人类活动对其影响显著,后期随着政府生态保护措施的实时和人们生态意识的增强,同时随着经济快速发展,人们生活质量提升,对生态环境保护意识越来越强及国家的大力呼吁下,后期POP和GDP对嘉陵江流域的影响逐渐下降。但在2015年时,地形因子和自然气候条件变化是影响嘉陵江流域的生态环境质量的主要因子。有研究证明,随着全球气候变暖,长江流域大部分地区发生的季节性干旱的面积整体呈扩大趋势,同时极端气候事件也在逐渐增强。因为嘉陵江流域的很多区域露天采矿较多,该区域土质松散,垂直节理发育,遇水则容易溶解,因此在地形和气候的双重影响下该地区极易造成泥石流、滑坡等自然灾害^[22]。因此,嘉陵江流域的生态环境质量

在地形和气候因子的协同作用下可能会发生显著变化。如夏季及时雨、大暴雨等天气增多,导致在 SLOPE 较大的地区发生滑坡、泥石流等自然灾害,从而对生态环境产生显著的影响^[30-31]。在因子交互作用探测方面,嘉陵江流域生态环境质量的空间分异性受多个影响因子共同作用,每两个因子之间相互作用的影响力都大于单一因子的影响力,其中地形因子和气象、土地利用因子之间的交互作用最为显著。嘉陵江流域整体生态环境质量上升,这表明嘉陵江流域在生态环境维持与治理方面政策的大方向是有效的,绝大部分区域生态环境质量都在提升,少部分地区略有降低,应针对性地进行政策调整,改善生态环境质量。根据地理探测器分析结果发现后期嘉陵江流域生态环境主要受到自然因素和土地利用变化的影响程度较大,说明后期需要进一步规范嘉陵江流域土地覆盖并进一步加强自然灾害的防护策略。

3.3 研究不足与展望

虽然本文综合评价了随着时间变化,LUCC, GDP, POP, DEM, SLOPE, TEM, PER 和 WIN 对 RSEI 的影响情况,但并未探究嘉陵江流域极端水文气象现状及其对嘉陵江流域生态环境质量的影响以及多因素是如何共同作用于生态环境质量的,这些仍需要进一步深入探究。其次,因目前很多政府较为关注未来嘉陵江流域在不同气候、人类活动和地形影响下嘉陵江流域生态环境质量可能发生的现状,但本文并未涉及这一部分内容。后期将进一步基于 Hurst 指数和过去 30 a 的 RSEI 数据在不同因素的控制下对嘉陵江流域 RSEI 可能的持续状态进行预测,为嘉陵江流域生态环境保护和政策制定提供更加详细的参考资料。

4 结 论

本文采用遥感数据、地形数据、人类活动数据和气象数据相结合的方法对嘉陵江流域 1990—2020 年的生态环境质量时空动态,并通过地理探测器分别得到不同时期不同因子对嘉陵江流域生态环境质量的直接作用和交互作用。研究表明 1990—2020 年嘉陵江流域生态环境质量整体呈上升趋势,但不同时期不同区域存在差异。其中,1990—1995 年陇南以北和达州以东地区生态环境质量呈退化趋势,平武部分地区呈改善趋势,其他区域基本保持不变。1995—2000 年遂宁等地区零星分布有轻微退化趋势的区域。2005—2010 年南充以南、广元以北等地区均呈轻微改善趋势。2010—2020 年嘉陵江大部分区域生态环境变化不明显,但在迭部地区以轻微退化趋势为主。

通过地理探测器结果显示,在主导因子方面嘉陵江流域生态环境质量前期主要受到 GDP 和 POP 的影响程度较大,但随着时间的变化受到 GDP 和 POP 的影响程度呈下降趋势,但 TEM, WIN, LUCC, DEM, SLOPE 和 PER 在 2015 年之前对嘉陵江生态环境质量影响较小,2015 年后对生态环境质量的影响程度呈增加趋势。因此可以发现嘉陵江流域生态环境质量在前期人类活动对其影响显著,但随着政府生态保护的实时和人们生态意识的增强,自然因素的影响逐渐增强。在因子交互作用探测方面,嘉陵江流域生态环境质量的空间分异性受多个影响因子共同作用,每两个因子之间相互作用的影响力都大于单一因子的影响力,其中地形因子和气象、土地利用因子之间的交互作用最为显著。嘉陵江流域整体生态环境质量上升,这表明嘉陵江流域在生态环境维持与治理方面政策的大方向是有效的,绝大部分区域生态环境质量都在提升,少部分地区略有降低,应针对性地进行政策调整,改善生态环境质量。根据地理探测器分析结果发现后期嘉陵江流域生态环境主要受到自然因素和土地利用变化的影响程度较大,说明后期需要进一步规范嘉陵江流域土地覆盖并进一步加强自然灾害的防护策略。

参考文献:

- [1] Zhou J, Liu W. Monitoring and evaluation of eco-environment quality based on remote sensing-based ecological index(RSEI) in Taihu Lake Basin, China[J]. Sustainability, 2022,14(9):5642.
- [2] Sowińska-świerkosz B. Application of surrogate measures of ecological quality assessment: The introduction of the Indicator of Ecological Landscape Quality(IELQ) [J]. Ecological Indicators, 2017,73:224-234.
- [3] Zhang J, Zhang A, Song M. Ecological benefit spillover and ecological financial transfer of cultivated land protection in river basins: a case study of the yangtze river economic belt, China[J]. Sustainability, 2020,12(17):7085.
- [4] 王志超,何新华.基于植被覆盖度和遥感生态指数的成都市锦江区生态质量评估[J].生态与农村环境学报, 2021,37(4):492-500.
Wang Z C, He X H. Assessments of ecological quality in Jinjiang district of Chengdu City using the FVC and RSEI models[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2021,37(4):492-500.
- [5] 章程焱,杨少康,董晓华,等.基于 RSEI 指数的长江上游流域生态环境质量时空演变及影响因子研究[J].水土保持研究,2023,30(1):356-363.
Zhang C Y, Yang S K, Dong X H, et al. Research on spatiotemporal evolution and influencing factors of eco-

- logical environment quality in the upper Yangtze River basin based on RSEI Index[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023,30(1):356-363.
- [6] Li Q Y, Wang Z, Cui J, et al. Study on the classification of ecological environmental quality index RSEI in Aksu city based on TM data[J]. *Tianjin Agricultural Sciences*, 2018,24:63-67.
- [7] 胡孟珂,于欢,孔博,等.2001—2020年嘉陵江流域植被覆盖度时空变化特征[J].*人民长江*,2022,53(1):82-89.
- Hu M K, Yu H, Kong B, et al. Spatial-temporal variations of fractional vegetation coverage in Jialing River Basin from 2001 to 2020[J]. *Yangtze River*, 2022,53(1):82-89.
- [8] 俱战省,杨青森,邢培茹.1987—2015年嘉陵江源区植被覆盖度时空变化特征[J].*地球与环境*,2020,48(4):452-460.
- Ju Z X, Yang Q S, Xing P R. Spatial-temporal dynamics of the fractional vegetation coverage in the headwaters of the Jialing River from 1987 to 2015[J]. *Earth and Environment*, 2020,48(4):452-460.
- [9] 张亮,丁明军,张华敏,等.1982—2015年长江流域植被覆盖度时空变化分析[J].*自然资源学报*,2018,12(33):2084-2097.
- Zhang L, Ding M J, Zhang H M, et al. Spatiotemporal variation of the vegetation coverage in Yangtze River Basin during 1982-2015 [J]. *Journal of Natural Resources*, 2018,12(33):2084-2097.
- [10] Wang X, Zhao X, Zhang Z, et al. Assessment of soil erosion change and its relationships with land use/cover change in China from the end of the 1980s to 2010 [J]. *Catena*, 2016,137:256-268.
- [11] Li H S, Wang L J, Zhang Z Q, et al. Theoretical thought and practice of eco-environment synergistic management in the Yangtze River[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2021,11:409-417.
- [12] 徐勇,周清华,窦世卿,等.基于ZGS和TW模型的长江流域植被NPP时空演变特征[J].*应用生态学报*,2022,42(1):225-232.
- Xu Y, Zhou Q H, Dou S Q, et al. Spatial and temporal variability of climatic potential productivity in Yunnan Province, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022,42(1):225-232.
- [13] Ouyang Z Y, Wang Q, Zheng H, et al. National ecosystem survey and assessment of China(2000—2010) [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2014,29(4):462-466.
- [14] Willis K S. Remote sensing change detection for ecological monitoring in United states protected areas[J]. *Biological Conservation*, 2015,182:232-242.
- [15] 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.
- [16] Rouse J W Jr, Haas R H, Schell J A, et al. Monitoring vegetation systems in the great plains with arts. in proceedings of the thirdderts symposium [J]. Nasa Sp-351, Washington, Dc, Usa, 1973:309-317.
- [17] Alcaraz-Segura D, Lomba A, Sousa-Silva R, et al. Potential of satellite-derived ecosystem functional attributes to anticipate species range shifts[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2017,57:86-92.
- [18] Coutts A M, Harris R J, Phan T, et al. Thermal infrared remote sensing of urban heat:hotspots, vegetation, and an assessment of techniques for use in urban planning[J]. *Remote Sens. Environ.*, 2016,186:637-651.
- [19] Rhee J, Im J, Carbone G J. Monitoring agricultural drought for arid and humid regions using multi-sensor remote sensing data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010,114:2875-2887.
- [20] Gonçalves J, Alves P, Pôças I, et al. Exploring the spatiotemporal dynamics of habitat suitability to improve conservation management of a vulnerable plant species[J]. *Biodivers. Conserv.*, 2016,25:2867-2888.
- [21] 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 H Q. A remote sensing urban ecological index and its application [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(24):7853-7862.
- [22] Yang X, Meng F, Fu P, et al. Spatiotemporal change and driving factors of the eco-environment quality in the Yangtze River Basin from 2001 to 2019[J]. *Ecological Indicators*, 2021,131:108214.
- [23] 张伟,杜培军,郭山川,等.改进型遥感生态指数及干旱区生态环境评价[J].*遥感学报*,2023,27(2):299-317.
- Zhang W, Du P J, Guo S C, et al. Enhanced remote sensing ecological index and ecological environment evaluation in arid area [J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2023,27(2):299-317.
- [24] 王世杰,刘柯莹,孟长青.基于SPEI的嘉陵江流域旱涝时空演变分析[J].*水利水电快报*,2022,43(5):12-19.
- Wang S J, Liu K Y, Meng C Q. Spatiotemporal evolution characteristics of drought and flood in Jialing River Basin based on SPEI[J]. *Express Water Resources & Hydropower Information*, 2022,43(5):12-19.
- [25] Wang J, Li X, Christakos G, et al. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the heshun region, China[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2010,24(1):107-127.

- [26] 王丽霞,赵蕊,刘招,等.基于 RSEI 的延河流域生态环境质量监测与预估[J].干旱区研究,2022,39(3):943-954.
Wang L X, Zhao R, Liu Z, et al. Monitoring and prediction of ecological environmental quality in the Yanhe River Basin based on the remote sensing ecological index[J]. Arid Zone Research, 2022,39(3):943-954.
- [27] 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.
Wei Y H, Qian J P, Fan W W, et al. Dynamic monitoring of ecological environment quality in Lijiang River Basin based on RSEI[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2021,19(1):122-131.
- [28] Huang H, Chen W, Zhang Y, et al. Analysis of ecological quality in Lhasa metropolitan area during 1990-2017 based on remote sensing and google earth engine platform[J]. Journal of Geographical Sciences, 2021, 31(2):265-280.
- [29] 国家防洪抗旱总指挥部办公室.2011 年全国洪涝灾害情况[J].中国防汛抗旱,2012,22(1):26-26.
Office of the National Flood Control And Drought Relief Headquarters.2011 national flood disaster situation [J]. China Flood Control Anddrought Relief, 2012,22 (1):26-26.
- [30] 金佳鑫,肖园园,金君良,等.长江流域极端水文气象事件时空变化特征及其对植被的影响[J].水科学进展,2021,6(32):867-876.
Jin J X, Xiao Y Y, Jin J L, et al. Spatial-temporal variabilities of the contrasting hydrometeorological extremes and the impacts on vegetation growth over the Yangtze River basin[J]. Advances in Water Science, 2021,32 (6):867-876.
- [31] 黄涛,徐力刚,范宏翔,等.长江流域干旱时空变化特征及演变趋势[J].环境科学研究,2018,31(10):1677-1684.
Huang T, Xu L G, Fan H X, et al. Temporal and spatial variation characteristics and the evolution trends of droughts in the Yangtze River Basin[J]. Research of Environmental Sciences, 2018,31(10):1677-1684.
- ~~~~~
- (上接第 426 页)
- [24] Sherrouse B C, Semmens D J. Validating a method for transferring social values of ecosystem services between public lands in the Rocky Mountain region[J]. Ecosystem Services, 2014,8:166-177.
- [25] Bagstad K J, Semmens D J, Winthrop R. Comparing approaches to spatially explicit ecosystem service modeling: A case study from the San Pedro River, Arizona [J]. Ecosystem Services, 2013,5:40-50.
- [26] 杨洁,谢保鹏,张德罡.基于 InVEST 和 CA-Markov 模型的黄河流域碳储量时空变化研究[J].中国生态农业学报(中英文),2021,29(6):1018-1029.
Yang J, Xie B P, Zhang D G. Spatial and temporal changes of carbon storage in the Yellow River Basin based on InVEST and CA-Markov model[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021,29(6):1018-1029.
- [27] 杨园园,戴尔阜,付华.基于 InVEST 模型的生态系统服务功能价值评估研究框架[J].首都师范大学学报:自然科学版,2012,33(3):41-47.
Yang Y Y, Dai E F, Fu H. Research on the value evaluation of ecosystem services based on InVEST model [J]. Journal of Capital Normal University: Natural Science Edition, 2012,33(3):41-47.
- [28] 张雪.可能性聚类有效性评价研究[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2014.
Zhang X. Research on effectiveness evaluation of likelihood clustering[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2014.
- [29] Uzategui Salazar Marisela, Lillo Javier. A new approach to pollution vulnerability assessment in aquifers using K-means analysis[J]. Environmental Earth Sciences, 2022,81(20):495-525.
- [30] 吴昊,杨济时.小微企业融资支持方向:基于第三方电商平台的商业银行融资策略[J].财经问题研究,2015 (4):47-53.
Wu H, Yang J S. Direction of financing support for small and micro enterprises; Financing strategy of commercial banks based on third-party e-commerce platform[J]. Journal of Finance and Economics, 2015(4): 47-53.