

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.20220601.005.

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 Chengyan, YANG Shaokang, DONG Xiaohua, et al. Research on Spatiotemporal Evolution and Influencing Factors of Ecological Environment Quality in the Upper Yangtze River Basin Based on RSEI Index[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(1): 356-363.

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

章程焱^{1,2,3}, 杨少康^{1,2,3}, 董晓华^{1,2,3}, 赵程铭^{1,2,3}, 薄会娟^{1,2,3}, 刘冀^{1,2,3}

(1.三峡大学 水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002; 2.三峡库区生态环境教育部工程研究中心,
湖北 宜昌 443002; 3.水资源安全保障湖北省协同创新中心, 武汉 430072)

摘 要:为准确、及时地获取长江上游生态环境质量的变化趋势以及演变格局,基于 Google Earth Engine(GEE)平台的 MODIS 系列遥感数据,通过计算长江上游流域生长季 5—10 月的绿度(NDVI)、湿度(WET)、热度(LST)及干度(NDSI)4 个指标,采用主成分分析法(PCA)构建出遥感生态环境指数 RSEI,并对长江上游流域生态环境进行评价。结果表明:(1) 4 个指标在第 1 主成分(PC₁)上的平均贡献率为 71%,表明依据这 4 个指标在长江上游流域构建 RSEI 是可行的;(2) 长江上游流域 RSEI 整体呈现显著增加趋势($p < 0.05$),增加速率为 $1.1 \times 10^{-3}/a$,具体可细分为两个阶段,分别是快速增长期(2000—2010 年),其速率为 $5.9 \times 10^{-3}/a$,以及增速放缓期(2010—2020 年),其速率为 $3.9 \times 10^{-3}/a$;(3) 长江上游流域生态环境质量以优和良为主,且表现为南部比北部好及东部比西部好的空间分布格局;(4) 2000—2010 年流域生态环境质量改善明显,改善面积占 34.7%,2010—2020 年改善面积与退化面积接近,两者仅差 1.3%左右;(5) 2000—2020 年长江上游流域 RSEI 变化趋势为正的像元面积占长江上游流域总面积的 64.7%,其中显著退化的区域主要集中在嘉陵江下游地区;(6) 生态环境质量主导自然影响因子在 2000 年为热度>绿度>湿度>干度;2010 年依次为绿度>热度>湿度>干度;2020 年依次为绿度>湿度>热度>干度。综上,利用 GEE 平台能快速、准确地监测长江上游流域生态环境质量,近 21 年来流域生态环境质量整体呈改善态势,但针对嘉陵江下游生态退化现象需要引起政府重视,尽快提出一系列生态修复措施,防止其生态环境进一步恶化。

关键词:遥感生态环境指数; 长江上游流域; 时空特征; Google Earth Engine; 地理探测器

中图分类号: TP79; X87; X826

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)01-0356-08

Research on Spatiotemporal Evolution and Influencing Factors of Ecological Environment Quality in the Upper Yangtze River Basin Based on RSEI Index

ZHANG Chengyan^{1,2,3}, YANG Shaokang^{1,2,3}, DONG Xiaohua^{1,2,3},
ZHAO Chengming^{1,2,3}, BAO Huijuan^{1,2,3}, LIU Ji^{1,2,3}

(1.College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China; 2.Engineering Research Center of Eco-environment in Three Gorges Reservoir Region, of Education, Yichang, Hubei 443002, China; 3.Hubei Collaborative Innovation Center for Water Resources Security, Wuhan 430072, China)

Abstract: In order to accurately and timely obtain the change trend and evolution pattern of ecological environment quality in the upper reaches of the Yangtze River, based on the MODIS series remote sensing data of the Google Earth Engine (GEE) platform, the greenness (NDVI), humidity (WET), heat (LST) and dryness (NDSI) of the upper Yangtze River basin during the growing season from May to October. Using principal component analysis (PCA) to construct a remote sensing ecological environment index RSEI to evaluate the ecological environment of the upper reaches of the Yangtze River. The results show that: (1) average contribution rate of the four indicators on the first principal component (PC1) is 71%, indicating

收稿日期: 2021-09-12

修回日期: 2021-10-18

资助项目: 欧洲空间局、中国国家遥感中心项目(58516); 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司项目(DJ-ZDZX-2016-02-09)

第一作者: 章程焱(1998—), 男, 浙江温州人, 硕士研究生, 主要从事水文学及水资源研究。E-mail: 562585551@qq.com

通信作者: 董晓华(1972—), 男, 湖北秭归人, 博士, 教授, 主要从事水文学及水资源方面研究。E-mail: xhdong@ctgu.edu.cn

<http://stbcj.paperonce.org>

that it is feasible to build RSEI in the upper Yangtze River basin based on these four indicators; (2) overall RSEI in the upper Yangtze River is a significant increase trend ($p < 0.05$), and the increase rate is $1.1 \times 10^{-3}/a$, which can be divided into two stages, namely the rapid growth period (2000—2010), with a rate of $5.9 \times 10^{-3}/a$, and the slowdown period (2010—2020), the rate is $3.9 \times 10^{-3}/a$; (3) ecological environment quality of the upper reaches of the Yangtze River is mainly and good, and the performance is better in the south than in the northeastern part has a better spatial distribution pattern than the western part; (4) from 2000 to 2010, the quality of the ecological environment in the watershed improved significantly, with an improved area accounting for 34.7. From 2010 to 2020, the improved area was close to the degraded area, and the difference between the two was only about 1.3%; (5) from 2000 to 2020, the area of pixels with a positive RSEI change trend in the upper Yangtze River accounted for 64.7% of the total area of the upper Yangtze River basin, and the areas with significant degradation mainly concentrated in the lower reaches of the Jialing River; (6) environment quality dominated natural influences factors in 2000 were heat>greenness>humidity>dryness; 2010, the greenness>heat>humidity>dryness; in 2020, the greenness>humidity>heat>dryness. In summary, the use of the GEE platform can quickly and accurately monitor the ecological environment quality of the upper reaches of the Yangtze River. In the past 21 years, the ecological environment quality of the basin shown an overall improvement trend. However, the ecological degradation phenomenon in the lower reaches of the Jialing River needs to be paid attention by the government, and a series of ecological restoration measures are proposed as soon as possible prevent further deterioration of its ecological environment.

Keywords: remote sensing ecological environment index; the upper reaches of the Yangtze River Basin; spatial and temporal characteristics; Google Earth Engine; geographic detector

生态环境是关系到社会和经济可持续发展的复合生态系统,包括影响人类生存与发展的水资源、土地资源、生物资源等^[1]。我国高度重视生态环境保护,相继推出退耕还林还草工程及三北防护林等一系列生态修复工程。这一系列工程使我国的生态状况格局发生了巨大变化^[2]。但如何科学地针对区域生态状况建立客观的生态评价模型,是值得深入探究的问题,且评价模型的建立对于认识区域生态保护与建设具有重要的理论及现实意义。

随着 3S 技术的发展,目前国内外众多学者结合三者间的优势,分别从不同角度评估区域生态状态开展了一系列研究,也提出很多评价指数构成的评价模型。Sfriso 等^[3]从生态安全角度构建出 MaQI 指数,并对意大利的海洋生态环境进行了评价;Kim 等^[4]提出评价城市溪流生态健康的评估方法,该方法主要利用生理水平生物标志物及生物指示剂等来进行建立;国内学者对生态环境的研究起步较晚,且大多数研究是通过遥感卫星信息提取单一的指标对生态环境进行评价,如姚晓洁^[5]利用地表热度(LST)来评估城市热岛效应;刘路丹等^[6]利用 NDVI 对长江经济带的生态环境进行了评价;其余一些研究者也尝试使用多个指标对生态环境进行综合评价,如厉彦玲等^[7]利用指数评价法对区域生态进行了环境质量评估;傅伯杰^[8]对我国各省区的生态状况也做了定量的分析与评估;但国内对生态环境的研究主要是根据 2006

年国家环保局颁布的《生态环境评价技术规范》中的生态环境状况指数 EI 来开展^[9],但 EI 指数计算中各指标权重值固定,且以城市为评价单元,数据来源于统计数据,存在数据更新慢及获取难的问题,因此难以在大空间尺度下对生态环境进行评估。

卫星遥感数据具有大面积覆盖、可快速获取等特点,在生态评价中得到了广泛应用。Yang 等^[10]基于遥感数据并结合环境因素建立数学模型以实现湿地生态的评价。徐涵秋^[11]2013 年提出了遥感生态环境指数 RSEI, RSEI 为生态环境质量的评估提供了新方法,且由于 RSEI 的构建完全基于遥感影像,指标获取容易且能够全面、快速、客观地反映区域生态环境质量状况,因此在区域生态环境评价中获得了大量的应用^[12-16]。但由于 RSEI 的计算需要处理大量的遥感影像数据,对于计算机的配置要求较高,为解决这个问题,陈炜^[17]及张华^[18]等基于 Google Earth Engine 平台,对三江源地区及祁连山地区的生态环境质量进行了动态监测及分析,证明 GEE 平台对于大区域的生态环境评价具有明显的优势^[19]。

因此本文基于 GEE 平台,利用 MODIS 遥感影像数据,以整个长江上游流域作为研究区域,构建出 2000—2020 年 RSEI 指数,并利用计算出的 RSEI 对长江上游流域生态环境质量的时空演变进行研究,以为长江上游流域的生态环境保护及高质量发展提供依据。

1 研究区概况

长江上游流域位于 $24^{\circ}46'—35^{\circ}91'N$, $90^{\circ}47'—113^{\circ}31'E$, 长江源头至湖北宜昌江段, 流域面积约为 100 万 km^2 。长江上游是长江流域重要的生态安全屏障和水源涵养地, 承载着西部大开发和长江经济带等重大国家战略, 然而, 由于多年来的无序利用和过度开发, 长江上游生态环境恶化, 生态功能一度不堪重负, 传统落后产能呈现出体量大、风险高等特征, 动能疲软, 可持续发展面临极大挑战, 因此党的十八大以来, 习近平总书记公开强调要加强长江上游生态环境修复^[20]。长江上游流域自然地理条件差异显著, 横跨我国第 1、2 级阶梯, 海拔呈现为东南低西北高, 流域地形复杂, 河系众多, 主要包括金沙江、岷江、嘉陵江、乌江等著名河流。流域气候复杂, 东部为中亚热带湿润季风气候和北亚热带季风气候, 流域西北部为高原气候且横断山脉为亚热带高原季风气候, 不仅受西南、东南季风影响, 又受青藏高原影响。流域内多年平均降水量为 850 mm 左右, 多年平均气温为 $11.4^{\circ}C$ 左右, 均表现为东部向西南和西北方向递减^[21]。

2 数据来源及研究方法

2.1 数据来源

本研究遥感影像数据来自于 GEE 平台提供的美国国家航空航天局的 MODIS 系列数据, 分别是 MOD09A1 数据、MOD11A2 数据及 MOD13A1 数据。MOD09A1 影像数据提供了 Terra MODIS 波段 1 至 7 的 500 m 分辨率 8 d 合成的表面光谱反射率估计值; MOD11A2 影像数据提供了 1 km 空间分辨率的 8 d 平均陆面温度, 为与其他遥感数据空间分辨率统一, 将该遥感数据进行重采样至 500 m; MOD13A1 影像数据使用 500 m 分辨率 16 d 内的最优像素, 进而计算出每个像素位置的植被指数 Vegetation Indices (VI)。通过 GEE 编程调用研究区域所需年份生长季 (5—10 月) 的影像数据并使用平台官方提供的云掩膜算法去除云像元的干扰, 同时为剔除水体的干扰, 采用 MNDWI 水体指数剔除水体信息。

2.2 遥感生态指数计算

选用长江上游流域生长季绿度 (NDVI (Normalized Difference Vegetation Index))、热度 (LST (Land surface temperature))、湿度 (WET)、干度 (NDSI) 4 个指标作为构建生态指数的评价指标, 这 4 个因素与人类的生存环境息息相关, 同时也是人类能够直观感觉生态条件优劣的重要指标, 因此选用以上 4 个指标来构建 RSEI 遥感生态指数对长江上游流域生态环境进行评价。通过 GEE 平台, 采取主成分分析 (PCA (Principal Component

Analysis)) 法^[22] 构建遥感生态指数 (RSEI) 来反映长江上游流域的生态环境质量。在计算遥感生态指数时, 需先将 4 个指标进行正向归一化处理^[23] (MMS (Min Max Scaler)), 计算方法如下:

$$MMS = \frac{(I - I_{\min})}{(I_{\max} - I_{\min})} \quad (1)$$

式中: I 为指标值; I_{\min} 、 I_{\max} 分别代表计算年份该指标的最小值、最大值。经过 MMS 处理后, 用 4 个归一化处理后的指标构建 RSEI, RSEI 计算如公式为:

$$RSEI = PC1[f(NDVI, WET, LST, NDSI)] \quad (2)$$

式中: RSEI 为遥感生态指数; PC1 是主成分分析中第 1 主成分; f 表示对指标进行 MMS 处理。NDVI 代表绿度, 数据来源于 MOD13A1 遥感影像数据; LST 代表热度, 数据选取 MOD11A2 遥感数据; WET 代表湿度, 计算公式如式 (3) 所示^[24]; NDSI 代表干度, 计算公式如式 (4) 所示。

$$WET = A_1\rho_1 + A_2\rho_2 + A_3\rho_3 + A_4\rho_4 + A_5\rho_5 + A_6\rho_6 + A_7\rho_7 \quad (3)$$

式中: WET 代表湿度, $A_1—A_7$ 分别取值为 0.114 7, 0.248 9, 0.240 8, 0.313 2, -0.311 2, -0.641 6, -0.508 7; $\rho_1—\rho_7$ 分别代表 MOD09A1 的 1—7 波段的地表反射率。

$$NDSI = (SI + IBI) / 2 \quad (4)$$

式中: NDSI 代表干度; SI 代表裸土指数, 其计算公式如式 (5) 所示; IBI 表示城市建筑指数, 计算公式如式 (6) 所示。

$$SI = \frac{(\rho_6 + \rho_1) - (\rho_2 + \rho_3)}{(\rho_6 + \rho_1) + (\rho_2 + \rho_3)} \quad (5)$$

$$IBI = \frac{\frac{2\rho_6}{\rho_6 + \rho_2} - (\frac{\rho_2}{\rho_2 + \rho_1} + \frac{\rho_4}{\rho_4 + \rho_6})}{\frac{2\rho_6}{\rho_6 + \rho_2} + (\frac{\rho_2}{\rho_2 + \rho_1} + \frac{\rho_4}{\rho_4 + \rho_6})} \quad (6)$$

式中: $\rho_1—\rho_7$ 分别代表 MOD09A1 的 1—7 波段的地表反射率。

最后, 将初步得到的遥感生态指数 RSEI₀ 进行 MMS 处理, 其值处于 [0, 1] 之间得到最终的 RSEI 值, RSEI 值越接近于 1, 说明该区域生态环境质量越好, 反之, 越接近 0, 则说明该区域生态环境质量越差。根据《生态环境评价技术规范》^[25] 生态环境分级标准, 将 RSEI 划分为 5 个等级, 具体分级标准见表 1。

同时为了进一步分析长江上游流域生态环境变化的影响因素, 引入了地理探测器作为分析工具进行分析。地理探测器是一组探测空间分异性及揭示其背后驱动力的统计学方法, 其核心思想为假设两个变量之间有重要的影响关系, 那么这两个变量也应该具有相似的空间分布^[26]。地理探测器包括: 因子探测器、交互作用探测器、风险探测器和生态探测器 4 个探测器, 其中因子探测器可以探测某个因子是否是形成生态环境质量的主导因子^[27]。

3 结果与分析

3.1 长江上游流域生态环境质量指数构建

对长江上游流域 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年及 2020 年生长季绿度(NDVI)、湿度(WET)、热度(LST)及干度(NDSI)进行主成分分析,其结果见表 2,由表 2 可知,4 个指标中,绿度和热度的载荷多年均呈正值,说明两者对 RSEI 具有正效应,两者多年平均载荷值分别为 0.648 3 及 0.675 5,表明热度对 RSEI 比绿度的贡献要高。湿度及干度两者的多年平均载荷值为-0.004 6 及-0.000 1,均为负值,说明两者对 RSEI 是负效应,且两者对 RSEI 的贡献很小。另外,4 个指标在第 1 主成分(PC₁)上的贡献率最高达到 76.2%(2020 年),最低为 62.5%(2000 年),多年平均贡献率为 71%,可见 PC₁ 集中了各指标主要的特征信息,表明依据 PC₁ 利用 4 个指标构建 RSEI 在长江上游流域是可行的,具备一定的科学性及合理性,因此遥感生态指数是通过 PC₁ 将 4 个指标整合而成的。

表 1 遥感生态指数等级划分

划分依据	级别
$0 \leq RSEI < 0.2$	差
$0.2 \leq RSEI < 0.4$	较差
$0.4 \leq RSEI < 0.6$	一般
$0.6 \leq RSEI < 0.8$	良
$0.8 \leq RSEI \leq 1$	优

表 2 4 个指标第 1 主成分分析结果

年份	PC ₁				贡献率/%
	NDVI	WET	LST	NDSI	
2000	0.4861	0.0086	0.8738	-0.0018	62.5
2005	0.4316	-0.2166	0.8756	0.0057	68.1
2010	0.6754	-0.1148	0.7284	-0.0022	72.0
2015	0.6762	0.1461	0.722	-0.0002	76.1
2020	0.9721	0.1535	0.1775	-0.0018	76.2
平均值	0.6483	-0.0046	0.6755	-0.0001	71.0

3.2 长江上游流域生态环境质量时空格局

3.2.1 长江上游流域生态环境质量时间变化 长江上游流域年际 RSEI 均值变化趋势如图 1 所示,由图 1 可知,2000—2020 年长江上游流域 RSEI 总体呈显著波动缓慢增长趋势($p < 0.05$),增长速率为 $1.1 \times 10^{-3}/a$,表明长江上游流域整体呈现生态环境变好态势。长江上游流域多年 RSEI 均值为 0.58,其中,RSEI 最大值出现在 2005 年,其值为 0.643,最小值为 0.512,出现在 2007 年。流域 RSEI 在 2002—2010 年经历了剧烈上升—下降—上升波动,时间节点分别为 2002 年、2005 年、2007 年及 2010 年。对于 2002—2005 年 RSEI 持续增长的原因可能是由于我国 2002 年前后在长江上游流域全面启动退耕还林工程及天

然林保护工程,这两项工程的实施,在一定程度上改善了流域的生态环境质量^[28]。2005—2007 年 RSEI 呈现急剧下降态势,原因可能在于 2005 年以来,长江上游流域暖干化趋势显著,表现出干旱频次、程度更为剧烈的现象,进而导致流域生态环境质量退化^[29]。2007—2010 年长江上游流域 RSEI 为持续增长态势,主要是由于前面两项工程中的人造林不断生长,进而有效提高了长江上游流域绿度,使得生态环境得到改善。长江上游流域按照 RSEI 增长速率的不同,可划分为两个阶段,第 1 个阶段是 2000—2010 年的快速增长期,其增长速率为 $5.9 \times 10^{-3}/a$,第 2 个阶段是 2011—2020 年增速放缓期,相较于 2000—2010 年的快速增长期,其增长速率较缓,具体速率为 $3.9 \times 10^{-3}/a$ 。

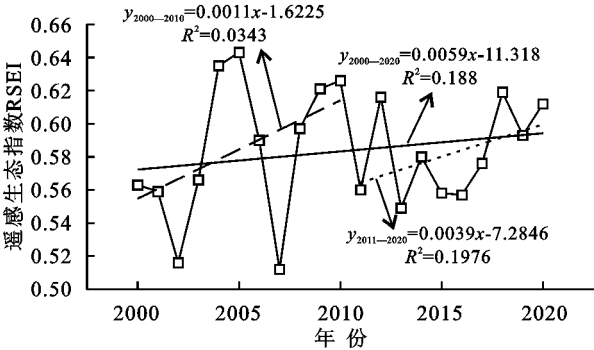
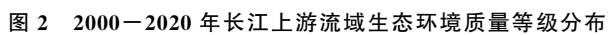


图 1 长江上游流域 RSEI 均值年际变化特征及不同时间的拟合关系

3.2.2 长江上游流域生态环境质量空间变化 长江上游流域 2000—2020 年的 RSEI 的空间分布如图 2 所示,选择 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2020 年进行分析,所选年份 RSEI 均值分别为 0.563, 0.643, 0.625, 0.557 及 0.612,长江上游流域近 21 年生态环境质量呈现“改善—退化—改善”趋势,总体呈现改善的趋势。在空间分布上,长江上游流域生态环境质量以优和良为主,面积之和占比均超过 47%,其中,生态质量为优的面积占比最多的是 2005 年,其值达到 29.3%,面积占比最少的是 2000 年,比例为 12%,其表现态势与总体变现态势一致,均是“改善—退化—改善”态势,生态质量为良的面积比例均在 33%以上,在 2010 年达到最大值为 46.8%,在 2005 年为最低值,达到 33.6%。长江上游生态环境质量表现为差的面积占比在 7%以下,2000 年其值最大为 6.8%,在 2020 年达到最小为 0.19%。在 2000—2010 年,长江上游流域生态质量为优的地区主要分布在嘉陵江流域下游,生态质量为差的地区主要分布在金沙江流域中上游,整体呈现为南部地区优于北部地区,东部地区优于西部地区。在 2010—2020 年,生态环境质量退化地区主要集中在嘉陵江下游流域,但整体生态质量呈现持续改善趋势。



3.3 长江上游流域生态环境质量演变趋势

3.3.1 生态环境质量等级演变 按照长江上游流域 RSEI 增长速度,以 2010 年为界,分为 2000—2010 年的快速增长期及 2010—2020 年的增速放缓期。2000—2010 年长江上游流域生态环境质量等级转移矩阵如表 3 所示。由表 3 可知,2010 年,长江上游流域生态质量以良为主,占流域总面积的 46.96%,一般及优占比相近,均在 17%左右,生态环境为差的面积仅占比 3.3%。2000—2010 年期间,长江上游流域生态环境质量演变趋势以不变为主,生态环境质量改善的面积为 351 727 km²,占长江上游流域总面积的 34.7%,生态环境质量退化的面积为 86 934 km²,仅占流域总面积的 0.09%,改善的面积比退化的面积多出 264 793 km²,由此可见,在 2000—2010 年长江上游流域生态环境质量在快速变好,主要原因在于生态质量由差转为较差面积 42 171 km²,较差转为一般面积 69 846 km²,一般转为良面积 118 749 km²及良转为优面积 99 607 km²的贡献较大,其总占比达 32.59%。

表 3 2000—2010 年长江上游流域生态环境质量等级转移矩阵						
生态环境质量等级		2010 年				
		项目	差	较差	一般	良
2000 年	差	面积/km ²	14481	42171	11361	2
		占比/%	1.43	4.16	1.12	0.00
	较差	面积/km ²	18951	97839	69846	8034
		占比/%	1.87	9.65	6.89	0.79
	一般	面积/km ²	28	8307	85167	118749
		占比/%	0.00	0.82	8.40	11.71
	良	面积/km ²		53	10994	301880
		占比/%		0.01	1.08	29.78
	优	面积/km ²			1188	47413
		占比/%			0.12	4.68
	总计	面积/km ²	33460	148370	178556	476078
		占比/%	3.30	14.64	17.61	46.96

2010—2020 年长江上游流域生态环境质量等级转移矩阵如表 4 所示。由表 4 可知,2020 年,长江上游流域生态质量依然以良为主,占流域总面积的 38.1%,生态环境质量为一般的面积占比由 2010 年的 17.61%增加到 26.9%,增加面积最多,生态环境质量为差的面积由 3.3%减少到 0.16%。生态环境质量为优的面积变化不大,仅下降了 0.69%。在 2010—2020 年期间,长江上游流域生态环境质量改善的面积为 220 422 km²,占流域总面积的 21.7%,生态环境质量退化的面积为 206 897 km²,占流域总面积的 20.4%,改善的面积比退化的面积仅多出 13 525 km²,由此可见在 2000—2010 年长江上游流域生态环境质量处于一个缓慢变好时期,在该时期生态质量由较差转为差面积 660 km²,一般转为较差面积 18 512 km²,良转为一般面积 63 378 km²及优转为良

面积 61 852 km²的贡献较大,总占比达 14.24%。

表 4 2010—2020 年长江上游流域生态环境质量等级转移矩阵						
生态环境质量等级		2020 年				
		项目	差	较差	一般	良
2010 年	差	面积/km ²	429	27575	54572	4
		占比/%	0.04	2.72	0.54	0
	较差	面积/km ²	660	111612	35735	267
		占比/%	0.06	11.01	3.53	0.03
	一般	面积/km ²	505	18512	104942	47859
		占比/%	0.05	1.83	10.35	4.72
	良	面积/km ²	51	21286	63378	294624
		占比/%	0.01	2.10	6.25	29.06
	优	面积/km ²	3	12630	27020	61852
		占比/%	0	1.19	2.54	6.10
	总计	面积/km ²	1648	191615	285647	404606
		占比/%	0.16	18.04	26.9	38.1

3.3.2 生态环境质量变化趋势 长江上游流域多年平均 RSEI 变化趋势及显著性空间分布如图 3 所示,由图 3A—3B 可知,2000—2020 年长江上游流域 RSEI 整体呈现改善趋势,RSEI 变化趋势为正的像元面积占长江上游流域总面积的 64.7%,其中以变化趋势以大于 0.003/a 为主,其像元面积占流域总面积的 32.8%,在各子流域均有分布。在显著性变化趋势检验中,长江上游流域 16.3%的区域呈现显著改善趋势($p<0.05$),呈现显著改善的区域主要集中在嘉陵江上游流域。48.4%的区域呈现不显著改善趋势($p<0.05$)。长江上游流域 35.3%的区域 RSEI 呈现退化趋势,其中 8.8%的区域呈显著退化趋势($p<0.05$),26.5%的区域呈现不显著退化趋势($p<0.05$),呈现不显著退化的区域主要分布在金沙江上游,呈现显著退化的区域主要分布在嘉陵江下游。通过分析发现嘉陵江上下游 RSEI 具有明显的差异性,上游生态环境持续改善、下游生态环境却表现出相反的趋势,呈现出显著退化趋势。针对嘉陵江上游生态环境持续改善现象,原因在于嘉陵江上游各级政府大力实施天然林资源保护、退耕还林、生态修复等措施,全力保障嘉陵江上游流域生态建设^[30]。嘉陵江下游生态持续退化的原因在于下游流域周边的城市扩张和人类剧烈活动导致了植被覆盖度的下降^[31],加上人口居住量的不断增多,导致土地出现紧缺现象,且由于当地居民生态意识浅薄,存在土地利用不当,盲目破坏生态环境现象^[32],进而导致嘉陵江下游流域生态环境质量呈现退化趋势。

3.4 长江上游流域生态环境质量演变影响因素

为了进一步分析影响长江上游流域生态环境质量变化的自然因素,本文引入了地理探测器用于揭示生态环境质量变化的主导因素。操作步骤为:将 RSEI 作为因变量,选取 NDVI,WET,LST,NDSI 作为自变量因子,

将 2000 年、2010 年、2020 年各指标量转换为类型量并通过自然断裂法分成 5 类,之后使用 10 km×10 km 的渔网均匀生成长江上游流域的 9 952 个点并通过这些点将因变量与自变量匹配,然后进行因子探测分析,得出 4 个指标因子对 RSEI 的影响力值(q 值, q 值越大表示某个指标因子对 RSEI 的影响力越大)和因子解释力值(p 值, p 值越小表示某个指标因子对 RSEI 的解释力越高)^[33]。分析结果如表 5 所示:NDSI 在 2000 年和 2020 年的 p 值均大于 0.05,说明 NDSI 在这两年对长江上游生态环境质量的影响不大,其余 3 个指标在 2000 年、2010 年、2020 年的 p 值均为 0,说明这 3 个指标对长江上游生态环境质量的解释力充足。 q 值均有不同程度的变化,从主导因子来看,2000 年、

2010 年、2020 年对 RSEI 影响最大的因子是热度和绿度;2010 年与 2000 年相比,各项指标的 q 总体波动较大,绿度和湿度的 q 值明显增大,表明 2000—2010 年长江上游生态环境质量改善的原因是受到植被覆盖度增大和湿度变化的影响;2020 年与 2010 年相比,绿度的 q 值增加而其他 3 个指标的 q 值减少,表明长江上游流域生态环境质量变好的原因是植被覆盖度的增加。2000—2019 年长江上游流域年平均气温和累计降水量呈上升趋势(图 4),年平均气温上升显著($p<0.05$),因此长江上游流域生态环境质量发生变化可能与温度的升高有关,年累积降水量虽然呈上升趋势,但显著性不强,后续的研究中需要结合土地利用类型等其他相关因子进行综合分析。

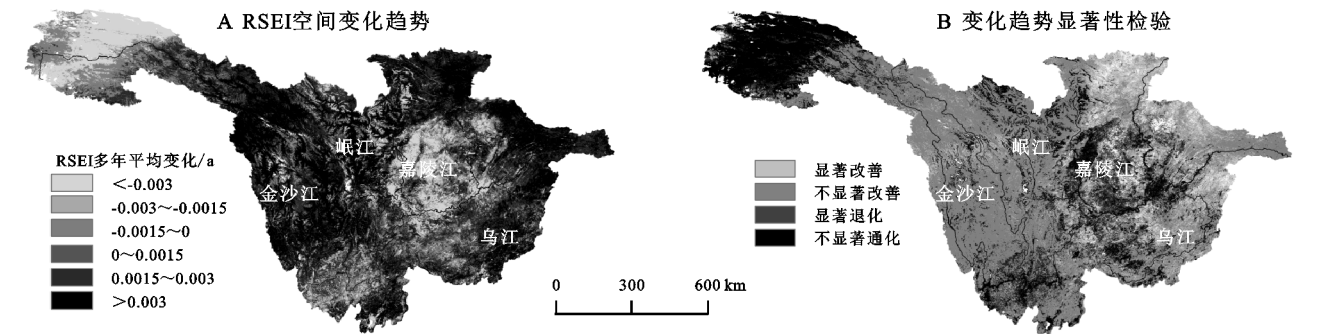


图 3 长江上游流域多年平均(2000—2020 年)RSEI 变化趋势及显著性空间分布

表 5 长江上游流域 4 个影响因子探测结果

因子	2000 年			2010 年			2020 年		
	q (影响力)	p (显著性)	q 排序	q (影响力)	p (显著性)	q 排序	q (影响力)	p (显著性)	q 排序
NDVI	0.351	0	2	0.745	0	1	0.956	0	1
WET	0.299	0	3	0.405	0	3	0.35	0	2
LST	0.747	0	1	0.736	0	2	0.145	0	3
NDSI	0.001	0.054	4	0.185	0	4	0.0003	0.169	4

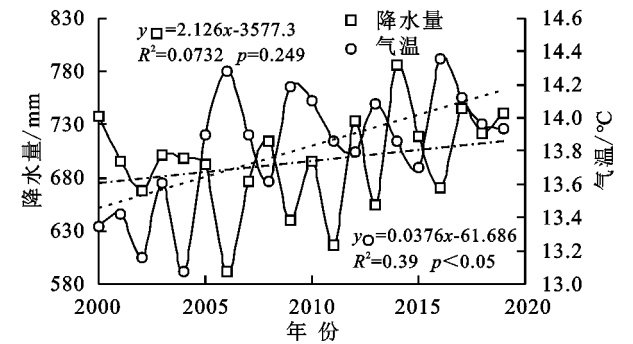


图 4 长江上游年降水量和平均气温变化

4 结论

本文通过 GEE 平台编写程序直接访问并调用数据库中的数据进行处理,利用 4 个指标快速构建出长江上游流域遥感生态指数 RSEI,并对其时空演变进行探究,得出结论如下:

(1) 4 个指标 PC_1 上的多年平均贡献率为 71%, PC_1 集中了大部分各指标特征信息,表明依据 PC_1 利用

4 个指标构建 RSEI 在长江上游流域是可行的。其中对生态环境质量呈正向作用的指标为绿度指标和热度指标,而干度和湿度指标对生态环境质量有负面影响。

(2) 2000—2020 年长江上游流域 RSEI 呈显著增长趋势($p<0.05$),其增长速率为 $1.1\times10^{-3}/a$,其多年平均 RSEI 为 0.58。2000—2010 年为 RSEI 快速增长期,其增长速率为 $5.9\times10^{-3}/a$,2010—2020 年为 RSEI 增速放缓期,其增长速率为 $3.9\times10^{-3}/a$ 。

(3) 长江上游流域生态环境质量呈现“改善—退化—改善”趋势,主要以优和良为主,面积之和占比超过 47%,在空间上,生态质量表现为南部优于北部,东部优于西部。

(4) 长江上游流域 RSEI 趋势为正占总流域面积的 64.7%,其中 32.8%的变化趋势大于 0.003/a。嘉陵江流域生态质量上下游差异明显,上游地区主要表现为显著改善趋势,但其下游地区表现为显著退化趋势。

(5) 从成因分析来看,生态环境质量主导自然影响因子在 2000 年为热度>绿度>湿度>干度;2010

年依次为绿度>热度>湿度>干度;2020 年依次为绿度>湿度>热度>干度。

参考文献:

- [1] Xu M, Chen C, Deng X. Systematic analysis of the co-ordination degree of China's economy-ecological environment system and its influencing factor[J]. Environmental Science Pollution Research, 2019, 26 (29): 29722-29735.
- [2] 赵安周,刘宪锋,朱秀芳,等.2000—2014 年黄土高原植被覆盖时空变化特征及其归因[J].中国环境科学,2016, 36(5):1568-1578.
- [3] Sfriso A, Facca C, Ghetti P F. Validation of the Macrophyte Quality Index (MaQI) set up to assess the ecological status of Italian marine transitional environments [J]. Hydrobiologia, 2009,617(1):117-141.
- [4] Kim J H, Yeom D H, Kim J H, et al. New ecological health assessment approaches of an urban stream using molecular and physiological level biomarkers and bioindicators[J]. Animal Cells Systems, 2012,16(4): 329-336.
- [5] 姚晓洁,王霞,姚侠妹.基于 RS 技术的皖北城市阜阳市主城区热环境效应分析[J].生态学杂志,2021,40(10): 3209-3303.
- [6] 刘珞丹,李晶,柳彩霞,等.2000—2015 年长江经济带植被覆盖时空变化特征及影响因素分析[J].水土保持研究,2021,28(6):330-336,347.
- [7] 厉彦玲,朱宝林,王亮,等.基于综合指数法的生态环境质量综合评价系统的设计与应用[J].测绘科学,2005 (1):89-91.
- [8] 傅伯杰.中国各省区生态环境质量评价与排序[J].中国人口·资源与环境,1992(2):48-54.
- [9] 姚尧,王世新,周艺,等.生态环境状况指数模型在全国生态环境质量评价中的应用[J].遥感信息,2012,27(3): 93-98.
- [10] Yang Z, Shi X, Su Q. Knowledge-based raster mapping approach to wetland assessment: a case study in Suzhou, China[J]. Wetlands, 2016,36(1):143-158.
- [11] 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.
- [12] 陈丽红,刘普幸,花亚萍.基于 RSEI 的疏勒河流域生态环境质量综合评价及其成因分析[J].土壤通报,2021,52 (1):25-33.
- [13] 何盈利,尤南山,崔耀平,等.2000 年来中国生态状况时空变化格局[J].自然资源学报,2021,36(5):1176-1185.
- [14] 李尧,袁红,罗建松,等.基于 RSEI 模型的生态环境质量评价研究[J].测绘与空间地理信息,2021,44(4): 117-119,124.
- [15] 吕大伟,蔡海生,张学玲,等.基于遥感生态指数的弋阳县生态安全格局构建及优化[J].农业现代化研究, 2021,42(3):545-556.
- [16] 潘洪义,李加安,张琴.基于 RSEI 的地震区生态环境质量恢复研究:以汶川县为例[J].长江流域资源与环境, 2021,30(3):745-757.
- [17] 陈炜,黄慧萍,田亦陈,等.基于 Google Earth Engine 平台的三江源地区生态环境质量动态监测与分析[J].地球信息科学学报,2019,21(9):1382-1391.
- [18] 张华,宋金岳,李明,等.基于 GEE 的祁连山国家公园生态环境质量评价及成因分析[J].生态学杂志,2021, 40(6):1883-1894.
- [19] Shan W, Jin X, Ren J, et al. Ecological environment quality assessment based on remote sensing data for land consolidation[J]. Journal of Cleaner Production, 2019,239:118126.
- [20] 文传浩,张智勇,曹心蕊.长江上游生态大保护的内涵、策略与路径[J].区域经济评论,2021(1):123-130.
- [21] 孙甲岚,雷晓辉,蒋云钟,等.长江流域上游气温、降水及径流变化趋势分析[J].水电能源科学,2012,30(5):1-4.
- [22] 高燕俐,刘小刚,冷险险,等.基于主成分分析的广西省干旱时空格局[J].生态学报,2020,40(16):5591-5601.
- [23] 徐光来,李爱娟,徐晓华,等.中国生态功能保护区归一化植被指数动态及气候因子驱动[J].植物生态学报, 2021,45(3):213-223.
- [24] 郑子豪,吴志峰,陈颖彪,等.基于 Google Earth Engine 的长三角城市群生态环境变化与城市化特征分析[J].生态学报,2021,41(2):717-729.
- [25] 中国环境监测总站.生态环境状况评价技术规范(试行)[P].行业标准—环保,2006, HJ/T 192-2006: 11 P.;A4.
- [26] 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.
- [27] 排日海·合力力,咎梅,阿里木江·卡斯木.乌鲁木齐市生态环境遥感评价及驱动因子分析[J].干旱区研究,2021,38(5):1-16.
- [28] 胡晓曦,第宝锋,袁媛,等.长江上游生态建设工程与植被覆盖时空变化的响应特征研究[J].长江流域资源与环境,2016,25(8):1264-1272.
- [29] 王雨茜,杨肖丽,任立良,等.长江上游气温、降水和干旱的变化趋势研究[J].人民长江,2017,48(20):39-44.
- [30] 邹自景.发挥良好生态环境优势筑牢嘉陵江上游生态屏障[J].环境保护,2019,47(17):67-69.
- [31] 张婷,薛东剑,段金亮,等.2000—2019 嘉陵江流域植被覆盖时空变化特征及气候响应分析[J].长江流域资源与环境,2021,30(5):1110-1120.
- [32] 潘学锐,隆建,徐旻玮.嘉陵江中下游水土流失成因与防治措施[J].农业工程技术,2018,38(2):28.
- [33] 李青松,张凤太,苏维词,等.长江经济带农业用水绿色效率测度及影响因素分析:基于超效率 EBM-Geodetector 模型[J].中国农业资源与区划: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3513.S.20210802.0855.004.html> 1-15.