

# 长江流域生态环境质量的时空演变 特征及其驱动因素

刘华东, 何贞铭, 郭琛

(长江大学 地球科学学院, 湖北 武汉 430100)

**摘要:** [目的] 探究 2001—2021 年长江不同子流域生态环境质量动态变化及其主导驱动因素, 以期为长江流域生态环境保护与经济发展战略的协调发展提供理论依据。[方法] 基于 MODIS 数据提取了 2001—2021 年 5—11 月长江流域遥感生态指数(remote sensing ecological index, RSEI), 并基于 RSEI 分析了长江流域近 21 a 来生态环境质量动态及其驱动因素。[结果] ①长江流域中下游生态质量高于上游, 南部高于北部。除 2006 年外, 生态质量在中等等级以上的面积占 80% 以上, 整体生态水平较好。②生态环境质量变化整体以稳定变化为主, 呈上升趋势的区域有乌江、太湖水系、宜宾至宜昌、宜宾至湖口、金沙江流域。③RSEI 变化的主要驱动因素为湿度指标, 其次为温度指数。④生态环境质量受到风速的正影响较大。气温升高会导致长江流域生态环境质量变差, 但在金沙江流域、鄱阳湖流域、嘉陵江流域和湖口及以下干流地区气温升高有利于生态环境质量改善。⑤降水增多有利于大部分地区生态环境质量改善。[结论] 2001—2021 年流域生态环境质量整体以不变趋势为主, 但嘉陵江流域生态呈现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:** 生态质量; 遥感生态指数; 地形因子; 气候; 长江流域

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2023)02-0277-08

**中图分类号:** TP79, X87, X826

**文献参数:** 刘华东, 何贞铭, 郭琛. 长江流域生态环境质量的时空演变特征及其驱动因素[J]. 水土保持通报, 2023, 43(2): 277-284. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.02.032; Liu Huadong, He Zhenming, Guo Chen. Spatiotemporal variation and driving factors of ecological environment quality in Yangtze River basin [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(2): 277-284.

## Spatiotemporal Variation and Driving Factors of Ecological Environment Quality in Yangtze River Basin

Liu Huadong, He Zhenming, Guo Chen

(School of Geoscience, Yangtze University, Wuhan, Hubei 430100, China)

**Abstract:** [Objective] The dynamic changes of ecological environmental quality in different sub-basins of the Yangtze River from 2001 to 2021, and the impact of different driving factors on it were determined in order to provide a theoretical basis for the coordinated development of an ecological environmental protection strategy and an economic development strategy for the Yangtze River basin. [Methods] Based on MODIS data, the remote sensing ecological index (RSEI) of the Yangtze River basin from May to November (2001 to 2021) was extracted. The dynamics and driving factors of ecological environmental quality in the Yangtze River basin during the past 21 years were analyzed based on RSEI values. [Results] ① The ecological quality of the middle and lower reaches of the Yangtze River basin was higher than the ecological quality of the upper reaches. The ecological quality in the south was higher than in the north. Except for 2006, more than 80% of the study area had ecological quality above the middle level, and the overall ecological level was classified as good. ② The overall change in ecological environmental quality was classified as stable, and the regions with

收稿日期: 2022-07-07

修回日期: 2022-08-18

资助项目: 国家自然科学基金项目“青藏高原及周边 2002—2015 地下水储量变化的分离研究”(42004007)

第一作者: 刘华东(1995—), 男(汉族), 河南省三门峡市人, 硕士研究生, 研究方向为 GIS 研究及其应用软件开发、遥感技术应用与研究。  
Email: 1012161424@qq.com。

通讯作者: 何贞铭(1969—), 男(瑶族), 湖南省江永县人, 博士, 副教授, 从事 GIS 研究及其应用软件开发、流域时空动态分析与研究。Email: hzm@yangtzeu.edu.cn。

an upward trend in quality included the Wujiang River, the Taihu Lake water system, Yibin to Yichang section, Yibin to Hukou section, and the Jinsha River basin. ③ The main driving factor of RSEI change was the humidity index, followed by temperature indicators. ④ Ecological environmental quality was greatly affected by wind speed. Rising temperatures will lead to deterioration of the ecological environmental quality in the Yangtze River basin, but the temperatures in the Jinsha River basin, Poyang Lake basin, Jialing River basin, and Hukou and the lower main stream areas were conducive to improvement of ecological environmental quality. ⑤ Increasing precipitation was conducive to improvement of ecological environmental quality in most areas. [Conclusion] The overall ecological environmental quality of the Yangtze River basin has not changed during the past 21 years, but the ecological degradation of the Jialing River basin needs to be given attention by the government, and a series of ecological restoration measures should be put forward as soon as possible to prevent further deterioration of the ecological environment.

**Keywords:** ecological quality; remote sensing based ecological index; climate; topographic factor; Yangtze 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<sup>[1]</sup>。近几十年来,随着中国城市化快速发展,土地利用变化加剧,生态系统不断退化等,生态环境出现了各种生态问题(如土壤侵蚀、土地荒漠化、植被退化和生物多样性丧失)<sup>[2-4]</sup>。长江流域作为跨越中国东、中、西部经济区的典型带状区域,是中国重要的生态安全屏障<sup>[5-6]</sup>。自 1998 年夏季长江流域发生特大洪涝灾害以来,土壤盐渍化、水土流失、农田荒漠化等一系列次生灾害使其生态环境逐渐恶化<sup>[7-9]</sup>。因此,快速、有效地评估长江流域生态环境状况,监测其演变趋势并分析其影响因素对长江流域生态环境保护战略的评估和策略的制定至关重要。

自 2006 年中国环境保护部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)后,很多学者对中国甚至全球的生态质量进行了评估<sup>[10-11]</sup>。然而,在实际应用中,EI 经常面临获取指标困难和数据更新周期长的问题,且目前常用于生态环境质量的大多数评估模型使用单一生态因子<sup>[11]</sup>。如使用归一化植被差异指数(NDVI)<sup>[12]</sup>、叶面积指数(LAI)<sup>[13]</sup>和净初级生产力(NPP)<sup>[14]</sup>评估植被生长,基于遥感影像的热红外波段反演地表温度来监测城市热岛<sup>[15]</sup>、通过构建各种干旱指数来评估区域干旱状况等<sup>[16]</sup>。但生态系统是一个复杂的系统,单一指标往往无法全面有效地描述生态环境<sup>[11-17]</sup>。且这些指标通常面临权重确定困难,人的主观能动性较强等缺点。因此,2013 年徐涵秋<sup>[18]</sup>提出了基于遥感生态指数(RSEI),该指数利用主成分分析耦合了 4 个生态指标:绿色度(NDVI)、湿度(WET)、干燥度(NDBSI)和热度(LST)。如除了地表水,RSEI 的 WET 指数还可以代表土壤湿度<sup>[18-19]</sup>。除了建设用地,NDBSI 还可用于表征裸露土壤引起的土壤干燥<sup>[19]</sup>。因此,基于 RSEI 指数成为

了区域生态质量监测的新方法,比 EI 和 PSR 更有利于研究人员评估连续土地覆盖的生态状况<sup>[19-21]</sup>。如章程焱等<sup>[22]</sup>基于 RSEI 监测了长江上游流域生态环境质量,发现 2000—2020 年长江上游流域生态环境质量整体呈改善态势,但嘉陵江下游生态环境质量显著退化;Yang 等<sup>[23]</sup>基于 RSEI 评价了 2001—2019 年长江流域生态环境动态变化及其驱动因素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;Zhou 等<sup>[21]</sup>也基于 RSEI 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),2000—2010 年城市快速扩张是生态质量恶化的主要原因。目前虽已有对长江流域生态环境质量的研究,但关于生态环境质量的变化及驱动因素仍存在较大的争议,且近年来因气候变暖导致极端低温事件减少,极端高温事件与降水事件的逐渐增加,使生态问题成为 21 世纪严重影响长江流域经济健康持续发展的最复杂挑战之一,而综合评价地形、气候和人类活动等对生态环境的研究较少<sup>[2-6,21,23]</sup>。基于此,本文基于 RSEI 指数探究了 2001—2021 年长江不同子流域生态环境质量时空格局和演变趋势、生态环境质量变化的主导因子及地形和不同气候因子对生态环境质量的影响情况。研究结果可为长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

长江流域是指长江干流和支流流经的广大地区,面积为  $1.80 \times 10^6 \text{ km}^2$ ,从西到东横跨 19 个省和省级行政区,最后汇入东海。长江流域具有丰富的地貌类型,有山脉、高原、盆地、丘陵和平原。长江流域西北部海拔 3 500~5 000 m,东南部海拔低于 500 m<sup>[3]</sup>。气候类型复杂多样,青藏高原高寒气候带、西南热带季风

气候带、华中亚热带季风气候带等遍布研究区。年均降水量 1 067 mm,气温 1 月在  $-4\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,7 月在  $14\sim 32\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,年均道路蒸发量 541 mm<sup>[5]</sup>,土地利用类型主要为草地和耕地,其次为未利用地、林地和水域。

## 1.2 数据来源与处理

(1) 遥感数据。RSEI 指数的构建需要 4 个组成部分的指数数据,即绿度(NDVI)、干燥度(NDBSI)、湿度(WET)和热量(LST)。通过多次对比试验,本文将选择每年的 5—10 月的遥感数据作为 RSEI 计算的基础数据。其中,2001—2021 年 5—10 月的 NDVI、NDBSI 和 WET 指数是基于 Google Earth Engine (GEE, <https://code.earthengine.google.com/>) 平台提供的地表反射率产品(MOD09A1),MOD09A1(MODIS Terra 星 500 m 地表反射率 8 d 合成数据产品)提供了波段 1—7 的 500 m 分辨率 8 d 合成的数据产品。LST 数据源于 GEE 平台提供的地表温度产品(MOD11A2)的白天地表温度数据集,MOD11A2 为时间分辨率为 1 d、空间分辨率为 1 km 的陆地表面温度 L3 产品。NDVI、NDBSI、WET、和 NDBSI 的数据预处理及 RSEI 指数的批量计算均基于 GEE 平台完成,具体实现代码见 [https://code.earthengine.google.com/?accept\\_repo=users/wangmmcug/landsat\\_psc\\_lst](https://code.earthengine.google.com/?accept_repo=users/wangmmcug/landsat_psc_lst)。

(2) 气象数据(气温、降水和风速)。气象来源于中国气象数据网的日值数据集(<http://data.cma.cn/data/>),时间跨度为 2001—2021 年。本文采用 ANUSPLINE 将点数据插值为空间分辨率为 1 km、时间分辨率为 1 d 的栅格数据。

(3) DEM 数据。DEM 数据由资源环境数据与平台网站(<http://www.resdc.cn/User>)提供,分辨率为 1 km。坡度数据是基于 DEM 数据使用 ArcGIS 软件提供的 Slope 工具计算得到。

## 1.3 研究方法

1.3.1 遥感生态指数(RSEI)计算方法 RSEI 是一种新开发的聚合指数,仅使用遥感数据即可快速检测生态状况<sup>[18]</sup>。该方法选用绿度(NDVI,代表植被)、热量(LST,代表温度)、湿度(WET,代表土壤水分)和干度(NDBSI,代表建筑面积)4 个生态变量用于评估生态状况。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<sup>[18]</sup>。

(1) 绿度指标(NDVI)。NDVI 与植被覆盖状况具有显著相关性,被广泛用于反映区域植被生长状况

和生态环境,计算公式为:

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

式中: $\rho_{\text{nir}}$  为 MOD09A1 的近红外波段; $\rho_{\text{red}}$  为红光波段。

(2) 热量指标(LST)。本文使用的 LST 数据源于 MODIS 提供的 MOD11A2 产品,基于 GEE 平台将白天地表温度通过转换成实际地表温度以反映地表气候。计算公式为:

$$\text{LST} = \text{DN} \times 0.02 - 273.15 \quad (2)$$

式中:DN 为 MOD11A2 白天地表温度波段对应的灰度值。

(3) 湿度指标(WET)。本文使用的湿度指标是采用缨帽变换得到的,具体计算公式为:

$$\begin{aligned} \text{WET} = & 0.114\ 7 + \rho_1 + 0.248\ 9\rho_2 + 0.240\ 8\rho_3 + \\ & 0.313\ 2\rho_4 - 0.312\ 2\rho_5 - \\ & 0.641\ 6\rho_6 - 0.508\ 7\rho_7 \end{aligned} \quad (3)$$

式中: $\rho_i (i=1,2,3\cdots 7)$  分别为 MOD09A1 对应的 7 个波段的地表反射率数据。

(4) 干度指标(NDBSI)。因为研究区内存在建设用和裸土地,因此本文使用新型建筑指数(ABI)和裸土指数(BSI)合成的 NDBSI 来反映地表干燥度情况,计算公式为:

$$\text{NDBSI} = (\text{BSI} + \text{ABI}) / 2 \quad (4)$$

其中, $\text{BSI} = [(S_1 + \rho_{\text{red}}) - (\rho_{\text{blue}} + \rho_{\text{nir}})] / [(S_1 + \rho_{\text{red}}) + (\rho_{\text{blue}} + \rho_{\text{nir}})]$

$$\begin{aligned} \text{ABI} = & \left\{ \frac{2S_1}{S_1 + \rho_{\text{nir}}} - \left[ \frac{\rho_{\text{nir}}}{\rho_{\text{nir}} + \rho_{\text{red}}} + \frac{\rho_{\text{green}}}{\rho_{\text{green}} + S_1} \right] \right\} / \\ & \left\{ \frac{2S_1}{S_1 + \rho_{\text{nir}}} - \left[ \frac{\rho_{\text{nir}}}{\rho_{\text{nir}} + \rho_{\text{red}}} + \rho_{\text{green}} / (\rho_{\text{green}} + S_1) \right] \right\} \end{aligned}$$

式中: $S_1, \rho_{\text{red}}, \rho_{\text{green}}, \rho_{\text{nir}}, \rho_{\text{blue}}$  分别表示 MOD09A1 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)。由于这 4 个指标的不一致性,在进行主成分分析(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。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 个指标的不一致性,在进行主成分分析(PCA)之前对这 4 个指标进行归一化以实现单位统一<sup>[18]</sup>。

MNDWI 计算公式为:

$$\text{MNDWI} = (\rho_{\text{green}} - \rho_{\text{mir}}) / (\rho_{\text{green}} + \rho_{\text{mir}}) \quad (5)$$

式中: $\rho_{\text{green}}, \rho_{\text{mir}}$  分别表示 MOD09A1 对应的绿光波段和中红外波段。

指标归一化公式为：

$$NI_i = (I_i - I_{\min}) / (I_{\max} - I_{\min}) \tag{6}$$

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

RSEI 计算公式为：

$$RSEI_0 = 1 - PC_1 [f(NDVI, WET, LST, NDBSI)]$$
$$RSEI = (RSEI_0 - RSEI_{0min}) / (RSEI_{0max} - RSEI_{0min}) \tag{7}$$

式中： $PC_1$  为 4 个指标归一化后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。 $RSEI_0$  为转置后结果，4 个指标分别参考徐涵秋等<sup>[18]</sup>的研究成果，具体计算公式详见文献<sup>[18]</sup>。 $RSEI_{0max}, RSEI_{0min}$  分别为  $RSEI_0$  最大值和最小值。

1.3.2 RSEI 变化趋势分析 采用 Sen 斜率估计法分析 2001—2021 年长江流域 RSEI 变化趋势和变化速率。Sen 斜率的计算公式为<sup>[21-22]</sup>：

$$\beta = \text{median} \left( \frac{x_j - x_i}{j - i} \right), \quad \forall j > i \tag{8}$$

式中： $\beta$  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 气候对 RSEI 的贡献分析 本文采用多元线性回归分析法研究气温、降水和风速对长江流域 RSEI 的影响情况。气候因子的斜率用来表示其对 RSEI 的贡献情况，通过进行单样本双尾  $t$  检验来监测其显著性<sup>[24]</sup>。

$$RSEI_{cc} = a \times T + b \times P + c \times W + d \tag{9}$$

式中： $RSEI_{cc}$  为 RSEI 的预测值； $T, P, W$  分别代表气温、降水和风速； $a, b, c$  分别表示不同因子对 RSEI 的贡献； $d$  为常数项。

2 结果与分析

2.1 各指标主成分分析

本文基于 GEE 平台提供的 MODIS 数据和主成分分析模块对 2001—2021 年长江流域 RSEI 定量反演，长江不同支流的主成分分析结果(表 1)表明，长江不同子流域的第一主成分( $PC_1$ )和第二主成分( $PC_2$ )的特征贡献率之和在 80% 以上。

表 1 长江流域上、中和下游 2001, 2011 和 2021 年各指标主成分分析结果  
Table 1 Principal component analysis results of indicators in the upper, middle and lower reaches of the Yangtze River Basin in 2001, 2011 and 2021

年份	指数	乌江	嘉陵江	太湖水系	宜宾至宜昌	宜宾至湖口	岷沱江	汉江	洞庭湖 水系	湖口及 以下干流	鄱阳湖 水系	金沙江 石鼓以上	金沙江 石鼓以下
2001	NDVI	0.289	0.033	0.344	0.556	0.208	0.183	0.521	0.864	0.169	0.613	0.254	0.241
	LST	-0.568	-0.718	-0.725	-0.824	-0.761	-0.596	-0.326	-0.469	-0.517	-0.495	-0.593	-0.487
	WET	0.027	0.015	0.201	0.088	0.064	0.008	0.066	0.130	0.290	0.079	0.120	0.186
	NDBSI	-0.004	-0.066	-0.001	-0.069	-0.006	-0.026	-0.003	-0.130	-0.009	-0.003	-0.028	-0.085
	EV( $PC_1$ )	0.072	0.222	0.048	0.016	0.026	0.144	0.115	0.016	0.051	0.026	0.136	0.134
	EV( $PC_2$ )	0.015	0.010	0.015	0.010	0.014	0.023	0.009	0.007	0.015	0.017	0.020	0.025
	ECR $PC_1$ %	78.29	93.19	68.76	46.42	58.06	78.52	90.75	62.51	73.00	59.16	81.39	78.38
	ECR $PC_2$ %	16.74	4.20	21.41	29.39	31.65	12.72	7.21	27.60	21.54	37.12	12.19	14.41
2011	NDVI	0.150	0.647	0.790	0.574	0.435	0.354	0.038	0.661	0.618	0.182	0.230	0.317
	LST	-0.622	-0.762	-0.505	-0.816	-0.874	-0.292	-0.413	-0.745	-0.784	-0.570	-0.680	-0.272
	WET	0.067	0.012	0.344	0.069	0.218	0.096	0.027	0.084	0.054	0.226	0.100	0.189
	NDBSI	-0.002	-0.039	-0.048	-0.001	-0.002	-0.047	0.005	-0.014	-0.031	-0.009	-0.013	-0.019
	EV( $PC_1$ )	0.036	0.037	0.017	0.068	0.019	0.061	0.185	0.028	0.019	0.033	0.119	0.085
	EV( $PC_2$ )	0.029	0.014	0.011	0.012	0.009	0.026	0.008	0.024	0.010	0.018	0.020	0.030
	ECR $PC_1$ %	52.03	67.08	48.45	81.71	56.02	62.02	94.82	51.08	51.12	60.05	78.45	69.15
	ECR $PC_2$ %	41.58	25.77	30.88	14.36	27.91	26.69	3.92	43.01	27.56	34.04	13.37	24.02
2021	NDVI	0.447	0.227	0.386	0.819	0.367	0.110	0.113	0.141	0.762	0.290	0.110	0.295
	LST	-0.328	-0.518	-0.186	-0.572	-0.176	-0.221	-0.292	-0.391	-0.595	-0.478	-0.496	-0.419
	WET	0.095	0.016	0.084	0.040	0.152	0.058	0.037	0.110	0.256	0.133	0.097	0.160
	NDBSI	-0.003	-0.029	-0.012	-0.029	-0.025	-0.004	-0.003	-0.002	-0.017	-0.008	-0.024	-0.018
	EV( $PC_1$ )	0.072	0.020	0.020	0.023	0.037	0.186	0.134	0.053	0.019	0.027	0.878	0.135
	EV( $PC_2$ )	0.020	0.005	0.018	0.012	0.012	0.031	0.008	0.012	0.018	0.019	0.078	0.027
	ECR $PC_1$ %	72.74	75.97	42.77	57.37	68.13	82.36	93.22	77.20	44.39	53.98	87.81	77.40
	ECR $PC_2$ %	20.25	17.25	38.93	28.77	21.38	13.69	5.34	17.07	41.38	38.14	7.78	15.55

注：EV( $PC_1$ )为第一主成分对应的特征值；EV( $PC_2$ )为第二主成分对应的特征值；ECR  $PC_1$  %为第一主成分特征贡献率；ECR  $PC_2$  %为第二主成分特征贡献率。

因此,前两个主成分的加权叠加结果可以用来表示 LST, NDVI, NDBSI, WET4 个指标的大部分特征。分析这 4 个指标对 RSEI 的贡献率,可以看出 NDVI 和 WET 具有正的生态效益,而 NDBSI 和 LST 具有负的生态效益,这与现实相符。因此,本文中 RSEI 指标可以很好地反映长江不同子流域生态环境质量状况。

2.2 长江流域 RSEI 的空间分布特征

本文基于 GEE 平台分析了 2001—2021 年长江流域 RSEI 的时空动态,根据文献<sup>[24]</sup>将 RSEI 以 0.2 为间隔将长江流域生态环境分为差( $RSEI < 0.2$ )、较差( $0.2 \leq RSEI < 0.4$ )、中( $0.4 \leq RSEI < 0.6$ )、良( $0.6 \leq$

$RSEI < 0.8$ )、优( $\geq 0.8$ ) 5 个等级。从 2001, 2006, 2011, 2016 和 2021 年长江流域 RSEI 空间分布发现(图 1)RSEI 整体为中和良好等级,但不同年份存在显著空间差异,长江中、下游生态质量高于上游,南部高于北部。2001 年的生态环境质量最好,属于差和较差等级的比例仅为 0.06% 和 2.01%,尤其在鄱阳湖流域部分地区生态环境质量表现为优。2006 年的生态环境质量最差,0.23% 和 29.74% 的区域属于差和较差等级,仅有 0.16% 和 3.3% 的区域表为优和良。2011—2016 年长江流域生态环境质量相对较为稳定,但 2016—2021 年长江中游地区生态环境质量有所下降。

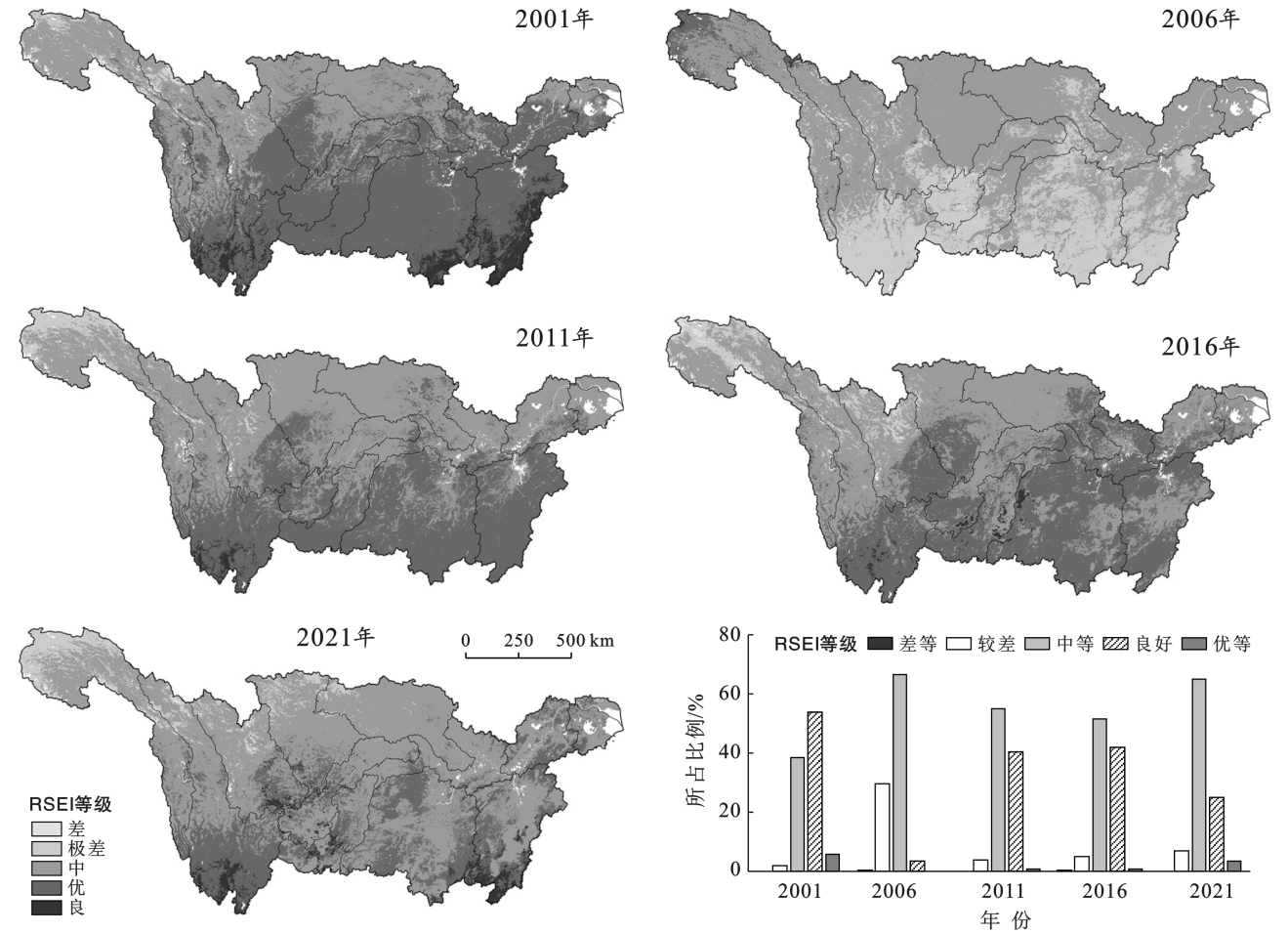


图 1 长江流域 2001, 2006, 2011, 2016 和 2021 年生境质量等级(RSEI)空间分布和统计

Fig.1 RSEI spatial distribution and statistical map of the Yangtze River basin in 2001, 2006, 2011, 2016 and 2021

2.3 长江流域 RSEI 演变趋势

不同地区的 RSEI 变化趋势存在明显空间差异(图 2)。其中,72.52% 的区域 RSEI 保持稳定,20.33% 的区域表现为退化趋势,仅有 7.15% 的区域为改善趋势。长江流域生态环境呈退化趋势的集中在鄱阳湖流域东南部、嘉陵江北部和金沙江流域,但鄱阳湖流域东南部、嘉陵江北部和金沙江流域生态质量为退化

趋势,亟需政府关注并采取相应的保护措施。

2.4 RSEI 对驱动因素的响应

2.4.1 RSEI 对环境因素的响应 为进一步探究 RSEI 对不同环境因子的响应情况,选择了具有空间异质性和年际变化较大的 LST 和 WET 分析 LST 和 WET 对长江流域 RSEI 时空演变的驱动机制(图 3),发现:长江流域 40.3% 的 RSEI 变化是由 WET 单独

驱动,22.72%的区域 RSEI 的变化是由 LST 单曲驱动,LST 和 WET 的组合因子解释了 21.79%的 RSEI 变化,15.59%的区域的 RSEI 变化由其他因素驱动。WET 主要对长江流域上游和下游地区的 RSEI 变化起到主要驱动作用,尤其在金沙江流域、洞庭湖流域、鄱阳湖流域和太湖流域较为明显。LST 主要驱动的地区集中在乌江流域和嘉陵江流域。长江中游地区的 RSEI 变化主要受到 WET 和 LST 的共同作用和气候因子的作用。

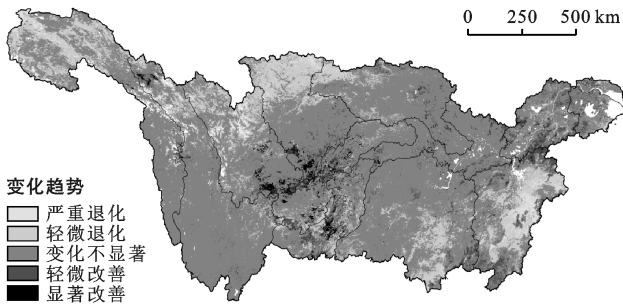


图 2 长江流域 2001—2021 年 RSEI 时空变化

Fig.2 The space-time change of RSEI in the Yangtze River basin from 2001 to 2021

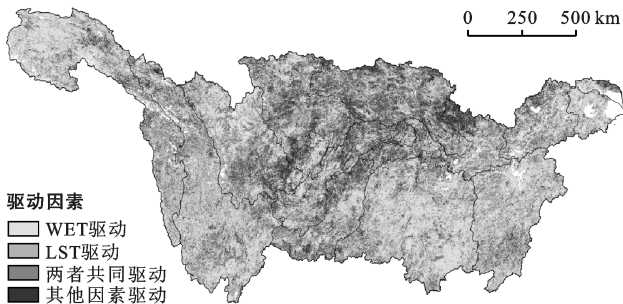


图 3 长江流域 4 种 RSEI 驱动因素类型的分布

Fig.3 Distribution of four types of four RSEI drivers in the Yangtze River basin

2.4.2 RSEI 对气候因素的响应 为探究气温、降水和风速对长江流域生态环境的影响,采用多元回归法分析了气温、降水和风速对 RSEI 的影响(图 4,表 2)。结果显示,气温、降水和风速对 RSEI 的影响存在显著的空间异质性。RSEI 对风速的敏感性最大(通过显著性检验占整体像元 81.26%, $p=0.05$ ),34.57%的区域 RSEI 与风速为正相关,主要分布在太湖流域、汉江流域、宜宾至宜昌、乌江流域和洞庭湖流域,其中风速对洞庭湖流域的 RSEI 的正影响最大(回归系数为 0.86)。气温与 RSEI 主要以负相关为主,但在金沙江流域、鄱阳湖流域、嘉陵江流域和湖口及以下干流地区为正相关。降水与 RSEI 主要以正相关为主,仅在长江源头、洞庭湖流域、宜宾至湖口和金沙江石鼓以下地区为负回归关系。

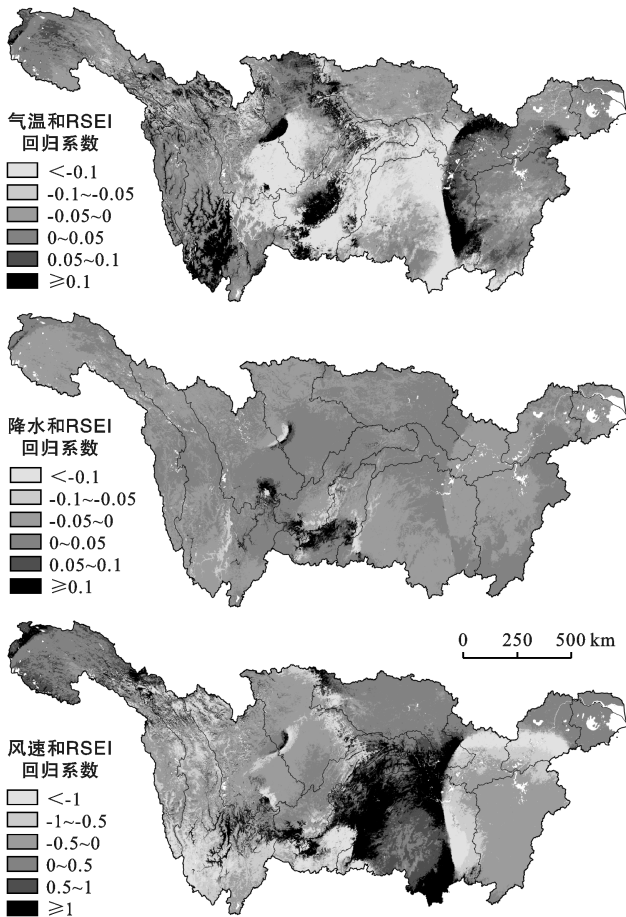


图 4 长江流域 RSEI 与温度、降水和风速的多元线性回归空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of the multiple linear regression between RSEI and temperature, precipitation and wind speed in the Yangtze River basin

3 讨论

长江流域作为长江水系从源头到入海所影响的重要地理生态区域,尽管在中国政府对生态可持续发展的重视下长江流域生态环境恢复工程效益日益体现<sup>[25-27]</sup>,但随着中国城镇化和经济发展迅猛,长江流域仍面临着土壤流失、中下游湿地面积减少、湿地生态系统退化、废水及污染物向中上游转移等生态环境挑战<sup>[6,26]</sup>。因此,本文基于 RSEI 指数分析了 2001—2021 年长江流域生态环境质量时空动态特征,发现长江流域生态环境质量整体为中和良好等级。其中,长江中、下游生态质量总体高于上游,南部高于北部。长江流域生态质量改善区主要位于长江中游滇黔川三省交界处、嘉陵江流域东南部、乌江流域北部和西南部、岷沱江东南部、洞庭湖流域西北部。这些地区自 1998 年罕见的洪涝灾害以来,已被列为长江流域水土流失防治重点地区。有研究显示在生态保护和恢

复政策实施下长江上游地区森林覆盖率提高了 12%~31.9%,土壤侵蚀力也下降了 37.9%~54.7%<sup>[25-26]</sup>。长江流域生态环境呈退化趋势的区域集中在鄱阳湖流域东南部、嘉陵江北部和金沙江流域。鄱阳湖流域作为中国经济发达地区,人类活动极为频繁,加之近年来气候变化造成的极端气候频发,对鄱阳湖流域的生态环境产生了显著影响。其次,有研究指出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、建设用地和其他土地,这对草地造成了沉重的压

力,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,长江源区天然草地退化严重,将不可避免地导致长江源区荒漠化加剧,从而使长江源头地区生态环境恶化<sup>[28]</sup>。长江流域大部分区域生态环境质量没有显著变化,这主要是因为川、鄂、湘、黔接壤地区是华中地区动植物复杂区,水土保持效果较好,生态承载力增强。这些地区的生态环境在近 21 a 来并没有因人类活动或者气候变化而受到显著的影响。

表 2 长江不同子区域流域 RSEI 与温度、降水和风速的多元线性回归统计  
Table 2 Multiple linear regression statistics of RSEI and temperature, precipitation and wind speed in different sub-basins of the Yangtze River

因素	回归系数											
	乌江	嘉陵江	太湖水系	宜宾至宜昌	宜宾至湖口	岷沱江	汉江	洞庭湖水系	湖口及以下干流	鄱阳湖水系	金沙江石鼓以上	金沙江石鼓以下
气温	-0.235	0.000	0.001	-0.112	-0.014	-0.089	-0.025	-0.065	0.008	0.001	0.023	0.070
降水	0.021	0.006	0.000	0.012	-0.001	0.013	0.001	-0.004	0.000	0.000	0.000	-0.001
风速	0.226	-0.205	0.114	0.431	0.004	-0.317	0.212	0.859	-0.479	-0.345	0.159	-0.195

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,气候变化也是 RSEI 变化的另一驱动因素。本文发现 RSEI 对风速的敏感性最大。RSEI 与风速为正相关的区域集中在太湖流域、汉江流域和长江源地区、宜宾至宜昌、乌江流域和洞庭湖流域,其中风速对洞庭湖流域的 RSEI 的正影响最大。这主要是因为这些地区植被覆盖度较高,植被类型主要为森林,风可以加快地表和大气热量的交换,促进土壤水分快速蒸发,使植物体内水分快速蒸腾。植物体叶表面温度迅速降低,使植被免遭受强烈阳光的热伤害<sup>[29-31]</sup>。其次,风速还可以改变环境的小气候,加快二氧化碳的交换,使外界的二氧化碳源源不断地提供给植物进行光合作用,在风媒植物开花传粉时期,风有助于植被传粉受精等。因此,风速的稍微增加可以改善该地区的生态环境<sup>[31]</sup>。气温与 RSEI 主要以负相关为主,但在金沙江流域、鄱阳湖流域、嘉陵江流域和湖口及以下干流地区为正相关。温度升高会增加土壤有机质的分解速率,促使土壤中的养分更容易矿化并提供给植被,从而有利于湿润和寒冷地区的植被生长,但对于干旱地区来说,温度升高会导致植被生长受到土壤水分胁迫的影响,从而导致植被生长受限,其次也会加速地表蒸散发增大,使生态环境质量降低<sup>[32]</sup>。降水与 RSEI 主要以正相关为主,仅在洞庭湖流域、宜宾至湖口和金沙江石鼓以下地区为负回归关系。由于长江流域大部分地区地处亚热带湿润气候,流域水分条件好,能够充分满

足人类生活和植被生长的需要。因此,RSEI 对降水量的敏感性较低。

本文虽综合评价了长江子流域生态环境质量时空动态及气温、降水和风速对其影响情况,但并未考虑不同因子间的相互作用对 RSEI 的影响及不同阶段 RSEI 对气候因素响应有何不同。此外,本文发现 2006 年 RSEI 急剧下降,究其原因可能与当年的极端气候事件密切相关,但本文并没有考虑到极端气候的影响以及 RSEI 对不同极端气候的相互作用的敏感性情况。因此后期我们将着重探究 RSEI 对不同极端气候事件的响应程度和方向以及不同极端气候的协同作用对 RSEI 的影响情况,为长江流域进一步评估和制定生态恢复提供理论依据。

4 结 论

- (1) 2001—2021 年长江中下游生态质量总体高于上游,南部高于北部。除 2006 年外,生态质量在中等级以上的面积在 80%以上,整体生态水平较高。
- (2) 长江流域 72.52%的区域生态环境质量保持稳定,20.33%的区域表现为退化趋势,7.15%的区域为改善趋势,生态环境质量呈上升趋势的区域有乌江、太湖水系、宜宾至宜昌、宜宾至湖口、金沙江石鼓以下流域。
- (3) 长江流域 40.3%的 RSEI 变化是由 WET 单独驱动,22.72%的区域 RSEI 的变化是由 LST 单独驱动,LST 和 WET 的组合因子解释了 21.79%的

RSEI 变化,15.59%的区域的 RSEI 变化由其他因素驱动。

(4) RSEI 对风速的敏感性最大,34.57%的区域 RSEI 与风速为正相关。气温与 RSEI 主要以负相关为主,但在金沙江流域、鄱阳湖流域、嘉陵江流域和湖口及以下干流地区为正相关。降水与 RSEI 主要以正相关为主,仅在洞庭湖流域、宜宾至湖口和金沙江石鼓以下地区为负关系。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] Sowinska-Swierkosz 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.
- [2] 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.
- [3] Wang Xiao, Zhao Xiaoli, Zhang Zengxiang, 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.
- [4] 杭鑫,罗晓春.基于 RSEI 模型的生态质量评估及城镇化影响:以南京市为例[J].*应用生态学报*,2020,31(1):219-229.
- [5] 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.
- [6] 叶许春,杨晓霞,刘福红,等.长江流域陆地植被总初级生产力时空变化特征及其气候驱动因子[J].*生态学报*,2021,41(17):6949-6959.
- [7] Li Haisheng, Wang Lijing, Zhang Zeqian, 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.
- [8] Wu Jiannan, Liu Qianqian, Chen Zitao, et al. How does the regional collaborative governance mechanism of air pollution in China operate well? Evidence from the Yangtze River Delta [J]. *Chinese Public Administration*, 2020,5:32-39.
- [9] Zhang Junfeng, Zhang Anlu, Song Min. 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.
- [10] Wang Chunli, Jiang Qunou, Shao Yaqi, et al. Ecological environment assessment based on land use simulation: A case study in the Heihe River Basin [J]. *Science of the Total Environment*, 2019,697:133928.
- [11] Xiong Yuan, Xu Weiheng, Lu Ning, et al. Assessment of spatial-temporal changes of ecological environment quality based on RSEI and GEE: A case study in Erhai Lake basin, Yunnan Province, China [J]. *Ecological Indicators*, 2021,125:107518.
- [12] 徐勇,郑志威,郭振东,等.2000—2020 年长江流域植被 NDVI 动态变化及影响因素探测[J].*环境科学*,2022,43(7):3730-3740.
- [13] 侯吉宇,周艳莲,刘洋.不同叶面积指数遥感数据模拟中国总初级生产力的时空差异[J].*遥感技术与应用*,2020,35(5):1015-1027.
- [14] 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].*水土保持通报*,2022,42(1):225-232.
- [15] 赵美亮,曹广超,曹生奎,等.1980—2017 年青海省地表温度时空变化特征[J].*干旱区研究*,2021,38(1):178-187.
- [16] 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.
- [17] Hazbavi Z, Sadeghi S H, Gholamalifard M, et al. Watershed health assessment using the pressure-state-response (PSR) framework [J]. *Land Degradation Development*, 2020,31:3-19.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] Huang Huiping, Chen Wei, Zhang Yuan, 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.
- [21] Zhou Jianbo, Liu Wanqing. Monitoring and evaluation of eco-environment quality based on remote sensing-based ecological index (RSEI) in Taihu Lake Basin, China [J]. *Sustainability*, 2022,14:5642.
- [22] 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素研究[J].2022,30(1):1-8.
- [23] Yang Xinyue, Meng Fei, Fu Pingjie, 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.
- [24] 金凯,王飞,韩剑桥,等.1982—2015 年中国气候变化和人类活动对植被 NDVI 变化的影响[J].*地理学报*,2020,75(5):961-974.
- [25] Zhang Guanhua, Ding Wenfeng, Wang Yifeng, et al. Analysis on water and sediment variation and the driving factors in Yangtze River Basin since 2000 [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020,34:98-104.

- 境科学, 2013, 33(5): 889-897.
- [19] Hang Xin, Luo Xiaochun, Cao Yun, et al. Ecological quality assessment and the impact of urbanization based on RSEI model for Nanjing, Jiangsu Province, China [J]. the Journal of Applied Ecology, 2020, 31(1): 219-229.
- [20] Fan Chao, Gui Feng, Wang Liuzhu, et al. Evaluation of environmental quality based on remote sensing data in the coastal lands of Eastern China [J]. Journal of Coastal Research, 2020, 36(6): 1229-1236.
- [21] 李蕊, 陈国清, 李玮贤, 等. 基于遥感生态指数的神东矿区 1995—2020 年生态环境质量的时空变化特征分析 [J]. 水土保持通报, 2021, 41(3): 143-151.
- [22] 胡思汉, 姚玉增, 付建飞, 等. 基于 RSEI 指数的东北矿区生态质量变化评价: 以辽宁弓长岭区为例 [J]. 生态学杂志, 2021, 40(12): 4053-4060.
- [23] 唐燕文. 基于遥感生态指数的东江源流域生态环境质量评价 [D]. 江西 赣州: 江西理工大学, 2021.
- [24] 陈丽红, 刘普幸, 花亚萍. 基于 RSEI 的疏勒河流域生态质量综合评价及其成因分析 [J]. 土壤通报, 2021, 52(1): 25-33.
- [25] 林中立, 徐涵秋. 基于遥感的海岛型城市发展生态效应分析: 以厦门岛为例 [J]. 福州大学学报 (自然科学版), 2019, 47(5): 610-616.
- [26] Wen Xiaole, Ming Yanli, Gao Yonggang, 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.
- [27] 中国海岛志 (浙江卷·第二册·舟山群岛南部) [M]. 北京: 海洋出版社, 2014.
- [28] 樊超, 桂峰, 赵晟. 海岛城镇空间扩展及景观生态演变研究: 以舟山为例 [J]. 海洋通报, 2019, 38(4): 447-454.
- [29] 唐常春, 李亚平, 杜也, 等. 1980—2018 年粤港澳大湾区国土空间结构演变 [J]. 地理研究, 2021, 40(4): 928-944.
- [30] 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.
- [31] Crist E P. A TM tasseled cap equivalent transformation for reflectance factor data [J]. Remote Sensing of Environment, 1985, 17(3): 301-306.
- [32] Muhammad Hasan Ali Baig, Zhang Lifu, Shuai Tong, et al. Derivation of a tasseled cap transformation based on Landsat 8 at-satellite reflectance [J]. Remote Sensing Letters, 2014, 5(5): 423-431.
- [33] Bannari A, Morin D, Bonn F, et al. A review of vegetation indices [J]. Remote Sensing Reviews, 1996, 13(1): 95-120.
- [34] Christos P, Manolis G G, Dimitrios D A. Exploring the impact of various spectral indices on land cover change detection using change vector analysis: A case study of Crete Island, Greece [J]. Remote Sensing, 2020, 12(2): 319.

(上接第 284 页)

- [26] Xie Ying, Zhang Jinchi. Forest protecting from a viewpoint of soil and water loss actuality of Huanghe River and Changjiang River Valley [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2002, 45(6): 88-92.
- [27] Chen Chi, Park Taejin, Wang Xuhui, et al. China and India lead in greening of the world through land-use management [J]. Nature Sustainability, 2019, 2(2): 122-129.
- [28] Liao Weihua, Jiang Weiguo. Evaluation of the spatio-temporal variations in the eco-environmental quality in China based on the remote sensing ecological index [J]. Remote Sensing, 2020, 12(15): 2462.
- [29] 叶许春, 杨晓霞, 刘福红, 等. 长江流域陆地植被总初级生产力时空变化特征及其气候驱动因子 [J]. 生态学报, 2021, 41(17): 6949-6959.
- [30] Cao J, Adamowski J F, Deo R C, et al. Grassland Degradation on the Qinghai-Tibetan Plateau: Reevaluation of Causative Factors [J]. Rangeland Ecology & Management, 2019, 72(6): 988-995.
- [31] 孙倩, 张敏, 曾永兵, 等. 艾比湖流域降水和风速对植被 NDVI 时空变化的影响 [J]. 西南农业学报, 2018, 31(11): 2407-2412.
- [32] Yin Lichang, Feng Xiaoming, Fu Bojie, et al. A coupled human-natural system analysis of water yield in the Yellow River basin, China [J]. Science of the Total Environment, 2021, 762: 143141.