

DOI: 10.5846/stxb202103040590

李冠稳,肖能文,李俊生.基于理想参照系-关键指标的赤水河流域生态系统质量变化趋势分析.生态学报,2021,41(18):7114-7124.

Li G W, Xiao N W, Li J S. Analysis the trend of ecosystem quality based on ideal reference and key parameters in the Chishui River Basin, China. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(18): 7114-7124.

基于理想参照系-关键指标的赤水河流域生态系统质量变化趋势分析

李冠稳^{1,2}, 肖能文^{1,*}, 李俊生¹

1 中国环境科学研究院 国家环境保护区域生态过程与功能评估重点实验室, 北京 100012

2 西北农林科技大学林学院, 杨凌 712100

摘要:赤水河流域是长江上游重要的生态安全屏障,针对赤水河流域经济开发与生态环境保护的突出矛盾,基于 MODIS 数据产品提取赤水河流域 2000—2018 年归一化植被指数 (NDVI)、叶面积指数 (LAI)、表层水分含量指数 (SWCI) 和陆地表面温度 (LST) 生态系统质量关键指标,利用 ENVI 主成分分析构建遥感生态指数 (RSEI),计算赤水河流域 2000—2018 年生态系统质量,进行 Sen+Mann-Kendall 趋势分析,并与贵州习水自然保护区林地最优状态下 RSEI 值进行比较,进而量化区域生态系统质量恢复潜力,为赤水河流域生态恢复、绿水青山就是金山银山重要理论实现提供科学参考。结果表明:RSEI 能够很好地反映赤水河流域生态系统质量时空分布特征,且绿度和湿度对赤水河流域生态系统质量起关键作用。赤水河流域 RSEI 平均值为 0.613,高值区域主要分布在下游湿润常绿阔叶林区,中游河谷中山阔叶林林、常绿针叶林区,上游镇雄县、威信县和叙永县交界处的高山常绿针叶林、落叶阔叶林区。赤水河流域近 20 年生态系统质量以整体以改善为主,但局部仍出现退化现象,其中生态系统质量显著改善面积占总面积的 6.12%,轻微改善面积占 59.51%,轻微退化面积占 23.17%,显著退化面积占 1.49%。赤水河流域林地 RSEI 值与理想参照系 RESI 值差距在 10% 以上面积占林地总面积的 49.82%,主要分布在大方县、桐梓县、播州区及怀仁市、习水县部分地区。

关键词:理想参照系;关键指标;赤水河;生态系统质量;趋势分析

Analysis the trend of ecosystem quality based on ideal reference and key parameters in the Chishui River Basin, China

LI Guanwen^{1,2}, XIAO Nengwen^{1,*}, LI Junsheng¹

1 State Environmental Protection Key Laboratory of Regional Eco-Process and Function Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

2 College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling 712100, China

Abstract: The Chishui River Basin is an important ecological security barrier in the upper reaches of the Yangtze River. In view of the prominent contradiction between economic development and eco-environmental protection in the Chishui River Basin, key parameters of normalized vegetation index (NDVI), leaf area index (LAI), surface water content index (SWCI), and land surface temperature (LST) of ecosystem quality in the Chishui River Basin from 2000 to 2018 were extracted based on MODIS data products. The remote sensing ecological index (RSEI) was constructed by ENVI principal component analysis to calculate the ecosystem quality in Chishui River Basin from 2000 to 2018, the trend analysis was carried out by Sen+Mann-Kendall method and the forestland ecological system quality of the Chishui River Basin was compared with the RSEI value under the optimal state of the forest land in Guizhou Xishui Nature Reserve to quantify the

基金项目:科技部重点研发计划项目(2016YFC0500206-1);生物多样性调查评估项目(2019HJ2096001006)

收稿日期:2021-03-04; 修订日期:2021-07-22

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xiaonw@163.com

restoration potential of the regional ecosystem quality, so as to provide a scientific reference for the ecological restoration of Chishui River Basin and the realization of the important theory that lucid waters and lush mountains are invaluable assets. The results showed that RSEI could well reflect the temporal and spatial distribution of ecosystem quality in Chishui River Basin, and greenness and humidity played a key role in the ecosystem quality of Chishui River Basin. The average value of RSEI in Chishui River Basin was 0.613, and the high value areas were mainly distributed in the humid evergreen broad-leaved forest in the lower reaches, the middle mountain broad-leaved forest and evergreen coniferous forest in the river valley of the middle reaches, and the alpine evergreen coniferous forest and deciduous broad-leaved forest at the junction of Zhenxiong County, Weixin County and Xuyong County in the upper reaches. In the past 20 years, the ecosystem quality of the Chishui River Basin has been mainly improved as a whole, but there was still local degradation, in which the significant improved of ecosystem quality accounted for 6.12% of the total regional area, the slightly improved area accounted for 59.51%, the slightly degraded area accounted for 23.17%, and the significantly degraded area accounted for 1.49%. The difference between the RSEI value and the RESI value of ideal reference system in Chishui River Basin was more than 10% accounting for 49.82% of the total forest area, which mainly distributed in Dafang County, Tongzi County, Bozhou District and some areas of Huairan City and Xishui County.

Key Words: ideal reference; key parameters; Chishui River; ecosystem quality; trend analysis.

生态系统质量是生态系统生产服务能力、抗干扰能力以及对人类生存与发展承载能力的具体体现,其变化关乎人类居住环境和物质生活水平^[1-2]。良好的生态系统质量也是推进我国生态文明建设进程的重要举措,因此研究生态系统质量的时空分布特征及其变化趋势有助于量化分析生态保护和生态恢复措施绩效,也能够为今后生态保护政策研究、城市发展战略制定提供科学依据^[3]。

生态系统质量评估通常以数学模型为基础,通过构建评估指标体系,量化生态系统质量。遥感技术以其快速、实时、大范围重复获取地物信息等优势被广泛应用于区域生态系统质量评估^[4-6]。国内外学者利用遥感技术进行生态系统质量评估开展了大量研究工作,广泛应用于森林^[7]、草地^[8]、荒漠^[9]、城市^[10]、矿区^[11]、自然保护区^[12-14]、流域^[15-18]、国家重点生态功能区^[19]等不同空间尺度。然而,上述研究多是基于现状-相对变化量的评估体系,即评估两个时间点生态系统质量的相对变化,以此判断生态系统质量的改善或恶化情况,缺少多年连续生态系统质量评估^[6-8,11-19]。如 Xu 等^[20]基于植被指数、生物量和净初级生产力评估了京津冀 2000、2010 年生态系统质量变化,发现京津冀生态系统质量的变化与三北防护林带和京津沙尘暴防治项目正相关。此外,上述研究缺乏统一评估指标体系,不同评估结果可比性较差;同时缺少与该区域最优状态下生产力(理想值)的比较,进而难以量化生态系统的恢复潜力。Xu 等^[21]提出的基于主成分分析方法的遥感生态指数(remote sensing based ecological index, RSEI),集成了能够响应生态系统质量的绿度、湿度、热度等多种关键生态因子,不仅与生态环境状况指数(ecological index, EI)有很好地可比性,在区域生态系统质量快速监测和评价方面也具有明显优势和使用价值^[22],在不同空间尺度区域得到广泛应用^[23-27]。如 Liao 等^[28]基于 MODIS 数据构建 RSEI 模型评估了我国 2000—2017 年生态环境质量变化,发现干燥是影响生态环境质量的最重要因素;杨江燕等^[29]运用 RSEI 方法对雄安新区进行生态系统质量评估,认为 RSEI 能综合反映各分量指标信息,雄安新区生态质量变化与其城镇扩张紧密负相关;同样朱泓等^[30]基于 RSEI 监测和评价了 1988—2018 年滇中湖泊流域生态环境质量变化,得到城市扩张和城市化是导致山间谷地和湖泊周围生态环境质量变差的重要原因。

赤水河流域拥有丰富的自然植被类型,亦是我国重要的生物资源基因库,亦是长江上游和三峡库区的重要生态屏障,在国家生态安全中发挥着重要作用。赤水河是目前长江上游唯一一条未建坝的支流,生态资源和生物多样性丰富,流域近四成县市位于国家重点生态功能区或生物多样性保护优先区。但赤水河流域地处乌蒙山连片特困地区腹地,人口较多,水土流失严重;加之流域工业化及城镇化的快速推进,存在以消耗破坏生态环境为代价的经济增长现象,始终面临着经济开发与生态环境保护的突出矛盾,因此开展水河流域生态

系统质量遥感监测和评估,对赤水河流域生态安全和保护长江上游生态屏障具有重要意义。本研究综合归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)、叶面积指数(Leaf Area Index, LAI)、表层水分含量指数(Surface Water Content Index, SWCI)和陆地表面温度(Land Surface Temperature, LST)构建遥感生态指数(RSEI),并结合 Sen+Mann-Kendall 趋势分析法分析赤水河流域 2000—2018 年生态系统质量变化趋势及相对恢复潜力,为赤水河流域生态环境保护、绿水青山就是金山银山理论实践以及城市经济发展提供科学参考。

1 数据与研究方法

1.1 研究区概况

赤水河为长江上游一级支流,发源于云南省镇雄县,干流全长 444.5 km,流域面积为 18932.2 km²,涉及云、贵、川 3 省 13 个县(市区)行政单位,并于四川省合江县汇入长江(图 1)。赤水河流域地处云贵高原和四川盆地接壤地带,气候差异较大,上游为暖温带高原气候,气温稍低;中下游为四川盆地丘陵区,具有亚热带湿润气候特点,气温较高。赤水河流域地形、地貌以山地和丘陵为主,土壤类型多样,其特殊的地理环境形成了多样的植被类型,植被类型从中亚热带湿润性常绿阔叶林向半湿润阔叶林过度,生物多样性较为丰富。赤水河还是长江上游唯一一条未建坝的一级支流,为保护长江上游特有鱼类及水生生物多样性提供重要栖息地或产卵场^[31]。

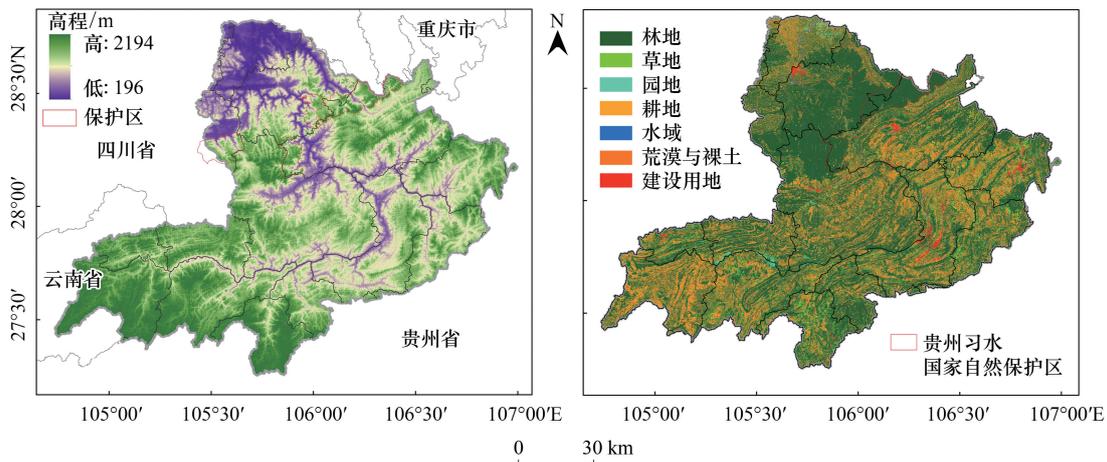


图 1 研究区概况和土地利用/土地覆被分布

Fig.1 Location of the study area and distribution of ecosystem

1.2 数据来源与处理

本文采用的遥感数据来源于 NASA MODIS 的 2000—2018 年 MOD09A1、MOD11A2、MOD13Q1 和 MOD15A2H 数据产品(<https://search.earthdata.nasa.gov/>),分别用于提取 SWCI、LST、NDVI 和 LAI 生态因子。首先利用 MRT(MODIS Reprojection Tools)软件进行影像拼接和投影转换,统一分辨率为 500 m;再利用最大值合成法得到月尺度生态参数数据,生长季(5—10 月份)取平均后,再通过归一化进行无量纲处理。2018 年土地利用/土地覆被数据(图 1)来源于国家基础地理信息中心,包括 8 大类 46 小类,数据坐标系采用 2000 国家大地坐标系,栅格格网大小 5 米,斑块分类精度优于 85%。赤水河流域以林地为主,占 61.3%;其次是耕地、建设用地、草地等。

1.3 遥感生态指数分量指标计算

(1) 表层水分含量指数(SWCI):水分是植物生长的基本条件,也是生态环境演变发展的一个主要因素。SWCI 可以很好地反映植被、水体和土壤湿度状况,可较好代表生态系统的“湿度”,与生态系统紧密相关^[32-33]。MOD09A1 数据 B_6 、 B_7 波段与水分反射率变化较为敏感,且有极为相同的大气散射和辐射值^[34],因

此可通过 B_6 、 B_7 波段计算 SWCI, 公式如下:

$$SWCI = B_6 - B_7 / B_6 + B_7 \quad (1)$$

式中: B_6 、 B_7 分别为 MOD09A1 影像波段反射值, $B_6 - B_7$ 能够反映植被和土壤中水含量, 并能够最大程度减少大气影响; $B_6 + B_7$ 作为分母能够使结果值限定在 $-1 \sim 1$ 之间。

(2) 陆地表面温度 (LST): 温度是影响植被生长的重要因子, 被广泛用于评价生态环境变化, 能较好地表征生态系统的“热度”^[23]。LST 是影响大气和地面之间能量和水平衡的关键参数, 与植被的生长与分布、地表水资源循环等密切相关, 是影响植被生长的关键因子, 也是生态系统变化的重要指示因子^[35-36]。LST 与气象观测空气温度有密切关系, 且一般地表温度高于气温, 将 MOD11A2 影像像元灰度值转换为常用摄氏度, 提取赤水河流域地表温度分布情况, 公式如下:

$$LST = 0.02 \times DN_s - 273.15 \quad (2)$$

式中: DN_s 为 MOD11A2 影像像元灰度值。

(3) 归一化植被指数 (NDVI) 和叶面积指数 (LAI): 植被是生态系统重要组成部分, 对生态系统环境变化较为敏感。NDVI 可用于监测植物生产状况, LAI 进一步反映植被生长质量, 被广泛应用于生态系统质量评估中^[37]。NDVI 是反映植物长势的重要参数之一, 用于表征生态系统质量的“绿度”^[11]。其公式如下:

$$NDVI = (\rho_{NIR} - \rho_{red}) / (\rho_{NIR} + \rho_{red}) \quad (3)$$

式中: ρ_{NIR} 、 ρ_{red} 分别代表 MOD13Q1 影像近红外波段和红波段的反射率。

LAI 是描述植被冠层几何结构的一个重要植被特征参数, 能够定量描述植被冠层表面能量交换, 是景观、能量、物质循环的重要参数^[38]。对非特殊 DN 值其公式如下:

$$LAI = 0.1 \times DN_A \quad (4)$$

式中: DN_A 为 MOD15A2H 影像的像元灰度值。

1.4 研究方法

1.4.1 遥感生态指数计算

将经归一化处理后的 4 个分量指标重新组合成一幅新影像, 通过 ENVI 软件主成分分析模块计算 RSEI 值。该方法最大优点是可根据数据本身确定权重, 不仅可以减少原始变量信息重叠, 而且可有效减少变量个数^[39]。公式如下:

$$RSEI = \frac{RSEI_0 - RSEI_{0_min}}{RSEI_{0_max} - RSEI_{0_min}} \quad (5)$$

$$RSEI_0 = 1 - PC_1$$

式中: RSEI 为归一化后遥感生态指数, 其值越大表示生态系统质量越好; 反之, 表示生态系统质量越差。RSEI₀ 为第 i 像元的原始遥感生态指数, RSEI_{0_max}、RSEI_{0_min} 分别为原始遥感生态指数的最大值和最小值, PC_1 为第一主成分载荷值。

1.4.2 Sen+Mann-Kendall 趋势分析

Theil-Sen Median 趋势分析和 Mann-Kendall 检验结合, 用于植被、气候等时序变化特征分析, 能够有效减少数据误差影响, 成为判断时序数据趋势变化的重要方法^[40-41]。Theil-Sen Median 公式为:

$$\beta_{NDVI} = \text{Media} \left(\frac{NDVI_j - NDVI_i}{j - i} \right) \quad 2000 \leq i < j \leq 2018 \quad (6)$$

式中: i, j 为年份, $NDVI_i$ 、 $NDVI_j$ 为第 i, j 年 NDVI 值; 当 $\beta_{NDVI} > 0$ 时, 表示 NDVI 时序上呈增长趋势; $\beta_{NDVI} < 0$, 则呈退化趋势; $\beta_{NDVI} = 0$, 保持不变。

Mann-Kendall 检验公式如下:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{Sgn}(NDVI_j - NDVI_i) \quad (7)$$

$$\text{其中,} \quad \text{Sgn}(\text{NDVI}_j - \text{NDVI}_i) = \begin{cases} 1, & \text{NDVI}_j - \text{NDVI}_i > 0 \\ 0, & \text{NDVI}_j - \text{NDVI}_i = 0 \\ -1, & \text{NDVI}_j - \text{NDVI}_i < 0 \end{cases} \quad (8)$$

方差 $V(S) = n(n-1)(2n+5)/18$ 。当 $n > 10$ 时, Z 统计量通过下式计算:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{V(S)}}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{V(S)}}, & S < 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中: n 是时间序列长度, Sgn 是符号函数, Z 值采用双边趋势检验, 在给定显著性水平 $\alpha = 0.05$ 情况下, $Z_{1-\alpha/2} = 1.96$ 作为显著与非显著的界定标准, 当 $Z > 1.96$ 时, 趋势显著; 反之不显著。

1.4.3 理想参照系选择

评估某一区域生态系统质量多是评估两个时间段间生态系统质量变化, 缺少与理想状态下生态系统质量差距比较, 即难以量化生态系统的恢复潜力。近几十年, 我国自然保护区、国家公园等的建设和发展, 为生态系统保护、确定理想参照系提供了可能。选择保护区内不同生态系统(如森林、草地、荒漠等)本底值较高区域作为理想参照系, 对比分析其他区域与最优状态下的生产力(即理想值或最优值)之间的差距, 以量化其他区域生态系统相对恢复潜力, 帮助管理部门树立明确的改善和保护目标。

2 结果与分析

2.1 生态系统质量描述性统计

依据上述公式, 分别得到赤水河流域 2000—2018 年 NDVI、LAI、LST、SWCI 近 20 年均值如图 2 所示。赤

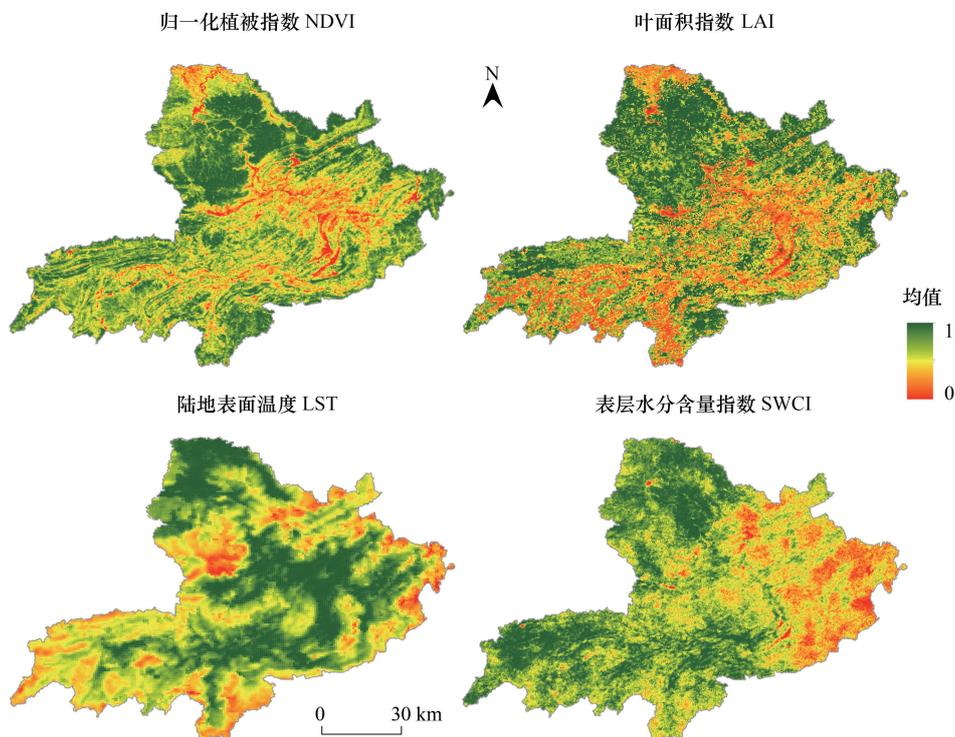


图2 2000—2018年 NDVI、LAI、LST、SWCI 均值空间分布

Fig.2 Spatial distribution of mean values of NDVI, LAI, LST, SWCI from 2000 to 2018

水河流域 NDVI、LAI 高值区域主要分布在赤水河下游古蔺县、赤水市、习水县交界处,土地利用类型主要为林地;低值区域主要分布在怀仁市、古蔺县和习水县交汇处,这些区域海拔较低,耕地和建设用地分布较多,人为干扰活动较强。LST 分布与 DEM 高度相关,高海拔区域 LST 值较低,低海拔区域 LST 值较高。SWCI 值呈现西部高、东部低趋势,与赤水河流域降水分布格局一致。

2000—2018 年赤水河流域 SWCI、LST、LAI、NDVI 和 RSEI 的均值和标准差如图 3 小提琴图所示。其中箱体长短代表各指标及 RSEI 值标准差,反映年际间波动状况;上下横线为值范围 10%—90%,中间横线为平均值。从图上可以看出,四个生态指数中 LST 变化差异最大,其次是 SWCI、LAI、NDVI。四个生态指数中 NDVI 平均值最大,为 0.76;其次是 LAI、LST、SWCI。赤水河流域近 20 年 RSEI 平均值为 0.613,且标准差较小,表明赤水河流域近 20 年生态系统质量较好,且变化比较平稳。

通过 RSEI 与各生态因子相关性分析,以验证 RSEI 能否代表各生态因子。各生态因子之间和各生态因子与 RSEI 之间相关系数如表 1 所示,Mc 为平均相关度。从表中可以看出,4 个指标中平均相关度最高的为 SWCI 和 NDVI,说明其对生态系统质量起关键作用,其次是 LST、LAI。RSEI 与 4 个指标相关系数均值为 0.899,均高于单个指标。由此可以得出,RSEI 指数不仅能集合各生态因子信息,相比单一生态因子更具有生态系统质量代表性。

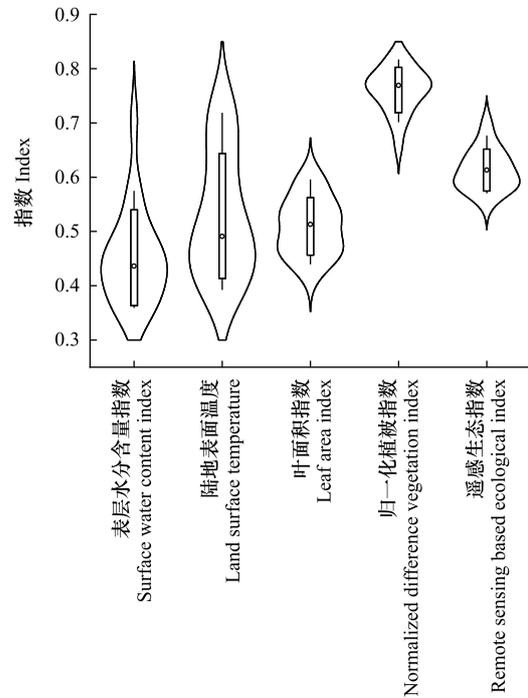


图 3 2000—2018 年 SWCI、LST、LAI、NDVI 和 RSEI 均值和标准差

Fig.3 Mean and standard deviation of SWCI、LST、LAI、NDVI and RSEI from 2000 to 2018

表 1 RSEI 与各指标相关性

Table 1 Correlation between RSEI and indicators

指标 parameter	陆地表面温度 Land surface temperature	叶面积指数 Leaf area index	归一化植被指数 Normalized difference vegetation index	表层水分含量指数 Surface water content index	遥感生态指数 Land surface temperature
陆地表面温度 Land surface temperature	1	0.665	0.904	0.929	0.929
叶面积指数 Leaf area index	0.665	1	0.750	0.730	0.725
归一化植被指数 Normalized difference vegetation index	0.904	0.750	1	0.976	0.974
表层水分含量指数 Surface water content index	0.929	0.730	0.976	1	0.967
平均相关度 Mean correlation	0.833	0.715	0.877	0.878	0.899

2.2 生态系统质量空间分布特征

通过计算获取 2000—2018 年赤水河流域逐年生态系统质量平均值空间分布(图 4),图中颜色由红色过度到绿色,表示生态系统质量综合评价值从低值向高值过度。赤水河流域 RSEI 平均值为 0.613,其中 RSEI 值在 0.6—0.8 范围占总面积的 56%,0.4—0.6 范围占 43.5%,赤水河流域生态系统质量整体较高。根据行政区边界可知,高值区域主要分布在赤水河流域下游赤水市、合江县湿润性常绿阔叶林区,中游金沙县、怀仁市、

古蔺县常绿针叶林、阔叶林区,上游镇雄县、威信县和叙永县交界处的高山常绿针叶林、落叶阔叶林区,这些地区水热条件较好,有利于落叶阔叶林、针叶林、草地的生长,生态系统质量较高。低值区域主要分布在上游镇雄县、七星关区及大方县,这些地区处于乌蒙连片特困区,坡耕地较多,同时属典型喀斯特地貌发育,加之这些地区石漠化严重,因此生态系统质量较低;赤水河中段桐梓县、播州区、怀仁市西北部及习水县中部,这些地区受土壤含沙量、地形及坡度影响,加之不合理开采行为,水土流失严重,生态系统质量亦较低。

2.3 生态系统质量变化状况分析

通过 Sen+Mann-Kendall 检验分析 2000—2018 年赤水河流域生态系统质量空间变化情况,如表 2 和图 5。赤水河流域近 20 年生态系统质量以整体以改善为主,但局部仍有退化现象。其中显著改善区域面积占总面积的 6.12%,轻微改善区域面积占总面积的 59.51%,稳定不变区域面积占 9.71%,轻微退化区域面积占 23.17%,显著退化区域面积占 1.49%。从空间分布看,生态系统质量明显改善区域主要位于古蔺县;大力实施天然林保护、退耕还林等生态建设工程是古蔺县生态系统质量显著提升的主要原因。轻微改善区域分布较广,主要位于大方县南部、古蔺县南部、播州区、桐梓县西部、习水县、赤水市、合江县和叙永县,与实行退耕还林、石漠化综合治理等大规模人工林建设工程将陡坡旱地、草地转化为林地密切相关;另一方面,生态示范区和自然保护区的建立如贵州习水国家级自然保护区、贵州赤水桫欏国家级自然保护区、燕子岩国家森林公园等很大程度上提高了生态系统质量^[42]。保持不变区域零散分布。轻微退化区域主要分布在上游七星关区、镇雄县、威信县,这些地区农业垦殖密度高,且多为坡耕旱地;下游怀仁市北部、合江县与赤水市交界处,这些地区由于酒业的发展,重视高经济价值红粮作物,轻育见效慢林木导致生态系统质量下降。显著退化区域主要位于赤水市城区及怀仁市中枢街道、盐津街道、苍龙街道、三合镇和茅台镇,主要是由于这些区域的城镇建设和酒工业发展导致草地、耕地面积减少。

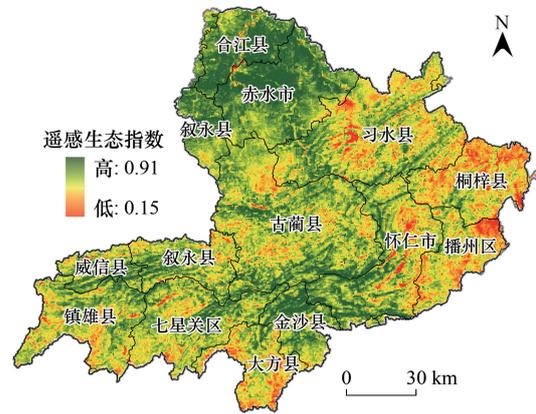


图 4 赤水河流域 2000—2018 年平均 RSEI 值空间分布

Fig.4 Spatial distribution of average RSEI from 2000 to 2018

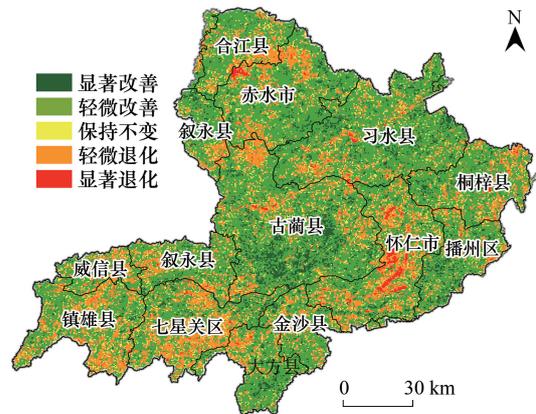


图 5 2000—2018 年赤水河流域 RSEI 变化特征图空间分布

Fig.5 Spatial distribution of RSEI based on trend and Hurst index

表 2 RSEI 变化趋势统计

Table 2 Statistics of RSEI Trend

β_{NDVI}	Z	变化状况 Changing situation	面积/km ² Area	占比/% Percentage
0.0005	≥ 1.96	显著改善	1130.61	6.12
≥ 0.0005	-1.96—1.96	轻微改善	10993.08	59.51
-0.0005—0.0005	-1.96—1.96	稳定不变	1794.06	9.71
≤ -0.0005	-1.96—1.96	轻微退化	4280.25	23.17
≤ -0.0005	≤ -1.96	显著退化	257.91	1.49

2.4 参照系-现状-变化量分析

建立基于理想参照系的生态系统质量评估指标体系,其关键是量化评估指标在环境适宜、未受或较少受到人为干扰即理想状态下的阈值。植被作为生态系统的重要组成部分,具有涵养水源、气候调节、提供生境等多种作用,是陆地生态系统存在的基础^[43]。赤水河流域林地占总面积的 61.3%,主要植被类型为亚热带常绿阔叶林、亚热带针叶林及亚热带、热带落叶阔叶灌丛;根据谢高地等^[44]中国生态区划方案,赤水河流域大部分位于黔中中亚热带常绿阔叶林生态区。贵州习水国家自然保护区建立于 1992 年,面积 48666 hm²;1997 年晋升为国家级自然保护区,主要保护对象为中亚热带常绿阔叶林森林生态系统。故选取贵州习水国家自然保护区湿润性常绿阔叶林区本底值较高区域为参照系,评估其他区域林地与该区域林地 RSEI 差值,量化其生态系统质量相对恢复潜力,即根据相对恢复潜力数值大小和资源条件划分成不同管理措施等级,进而调整具体管理策略,合理分配资源,提高管理成效。保护区内林地近 20 年 RSEI 理想均值为 0.69,其他区域林地与之差距如图 6 所示(负值表示高于保护区内林地 RSEI,正值表示低于保护区内林地 RSEI)。从图中可以看出,赤水河流域林地 RSEI 值与理想参照系 RESI 值差距在 10% 以上面积占林地总面积的 49.82%,主要分布在大方县、桐梓县、播州区及怀仁市、习水县部分地区。

3 讨论

遥感生态指数(RSEI)与 EI 相比,不仅在生态意义上具有较强的可比性,还具有较高的可视化及预测能力。本研究基于 RS 技术构建了 RSEI,并与 SWCI、LST、LAI 和 NDVI 4 个生态因子进行相关性分析,发现 RSEI 不仅能集合各生态因子信息,相比单一生态因子更具有生态系统质量代表性。4 个生态因子中,NDVI 和 SWCI 对生态质量贡献较大,RSEI 高值主要分布在湿度高、植被覆盖条件较好区域^[12, 45-46]。单薇等^[6]在评估常德市鼎城区生态环境质量时亦发现湿度和绿色指标对生态环境质量的改善至关重要。

赤水河流域生态系统质量改善面积远大于退化面积,这一定程度上反映了近 20 年生态恢复工程取得了一定成效。保护和恢复赤水河流域生态经济是发挥区域生态优势和绿色发展的需要,自 1990 年实施退耕还林、石漠化综合治理等大规模人工林建设工程以来,大方县南部、古蔺县、播州区、桐梓县西部、习水县、赤水市、合江县和叙永县生态系统质量不断改善,特别是古蔺县和大方县南部改善明显,这与许幼霞等^[42]、黄林峰等^[47]研究赤水河流域植被生态质量时空变化相似。但仍存在局部退化现象,如赤水河上游镇雄县、威信县及七星关区农业垦殖密度高,且多为坡耕旱地^[48],生态系统质量下降;仁怀市、桐梓县、习水县和赤水市局部,由于城镇建设和酒业发展亦出现生态系统质量退化现象^[49],特别是怀仁市中枢街道、盐津街道、苍龙街道、三合镇、茅台镇^[50]和赤水市、习水县城出现显著退化现象,这从侧面反映了人类活动对区域生态环境质量的重要影响^[51]。程志峰等^[52]研究城市群 RESI 变化时,证实了城市的扩张确实会带来生态的恶化,NDVI 和 WET 的增加会提高 RESI,有利于生态系统质量的改善,与本文研究结果相符。

评估某一区域生态系统质量多是评估两个时间段间生态系统质量变化,缺少与理想状态下生态系统质量差距比较,即难以量化生态系统的恢复潜力。本文选取贵州习水国家自然保护区湿润性常绿阔叶林区为参照系,量化其他区域林地与该区域林地 RSEI 差值,有 49.82% 林地面积 RSEI 差值在 10% 以上,主要分布在桐梓县、播州区、大方县及习水县、怀仁市部分地区,主要是受高原地形、土壤含沙量和人类活动影响^[53],这些特性

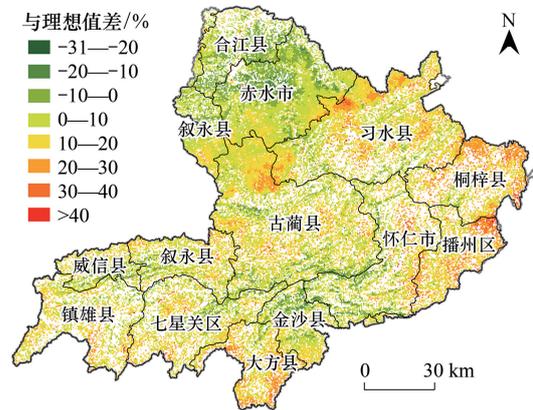


图 6 2000—2018 年赤水河流域林地 RSEI 值与理想参照系差值空间分布

Fig.6 The difference RSEI of woodland in Chisui river basin during 2000—2018 compared with the ideal value

使这些地区植被覆盖度和植被生长相对较差,与理想参照系 RSEI 值有一定差距,应加强林地保护、控制工业活动对生态保护的壓力。

RSEI 完全基于遥感信息技术,有利于快速、定量监测评估区域的生态环境质量变化^[12],但目前采用遥感技术监测生态系统质量还没有统一、完整的评价指标体系^[4,16,18,54-55],如何选择合适的生态系统因子并进行多因子耦合分析仍需要进一步创新研究。朱青等^[15]发现鄱阳湖区 RSEI 和地形因子中海拔和高程有较强的正相关性,但在黄土沟壑区富县^[56-57]、农牧交错区盐池县^[58]得出不同结论;同时温度过低或过高时均会反作用于生态系统^[3];如何定量评估海拔和温度对生态系统质量的影响还需进一步探讨。本文仅采用遥感技术评估区域生态系统质量,在快速、定量评估某一区域生态系统质量具有一定优势,但忽略了人类活动及生物多样性对生态系统质量的影响,因此所得结果可能与实际情况存在一定偏差,今后将进一步考虑人类活动、地形等生态指数对评估模型进行改进。

4 结论

本文从能够反映生态系统质量的植被绿度、植被质量、湿度和热度 4 个因子入手,构建生态系统质量评价模型,对赤水河流域 2000—2018 年生态系统质量进行时空变化分析。发现 RSEI 不仅能集合各生态因子信息,相比单一生态因子更具有生态系统质量代表性,可用于快速定量评估赤水河流域生态系统质量,且绿度和湿度对赤水河流域生态系统质量起关键作用。空间上,赤水河流域 RSEI 平均值为 0.613,高值区域主要分布在下游湿润常绿阔叶林区,中游河谷中山阔叶林林、常绿针叶林区,上游镇雄县、威信县和叙永县交界处的高山常绿针叶林、落叶阔叶林区。赤水河流域近 20 年生态系统质量整体以改善为主,但局部仍出现退化现象,其中生态系统质量显著改善区域面积占总面积的 6.12%,轻微改善区域面积占总面积的 59.51%,这与该区域实施退耕还林、石漠化综合治理等大规模人工林建设工程有关。轻微退化区域面积占 23.17%,显著退化区域面积占 1.49%,与城镇化建设和酒工业发展导致草地、耕地面积减少有关。选择习水国家级自然保护区中亚热带常绿阔叶林作为参照系,量化其他区域林地与该区域最优状态下 RSEI 的差距,发现有 49.82%林地面积 RSEI 差值在 10%以上,主要分布在桐梓县、播州区、大方县及习水县、怀仁市部分地区。

参考文献 (References):

- [1] 何念鹏,徐丽,何洪林.生态系统质量评估方法——理想参照系和关键指标.生态学报,2020,40(6):1877-1886.
- [2] 梁变变,石培基,王伟,唐笑,周文霞,敬焯.基于 RS 和 GIS 的干旱区内陆河流域生态系统质量综合评价——以石羊河流域为例.应用生态学报,2017,28(1):199-209.
- [3] 董天,肖洋,张路,肖焱,郑华,欧阳志云.鄂尔多斯市生态系统格局和质量变化及驱动力.生态学报,2019,39(2):660-671.
- [4] 陈强,陈云浩,王萌杰,蒋卫国,侯鹏,李营.2001—2010 年洞庭湖生态系统质量遥感综合评价与变化分析.生态学报,2015(13):4347-4356.
- [5] Song W, Song W, Gu H H, Li F P. Progress in the remote sensing monitoring of the ecological environment in Mining areas. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020, 17(6): 1846.
- [6] 单薇,金晓斌,孟宪素,杨晓艳,徐志刚,顾铮鸣,周寅康.基于多源遥感数据的土地整治生态环境质量动态监测.农业工程学报,2019,35(1):234-242.
- [7] Pfeifer M, Kor L, Nilus R, Turner E, Cusack J, Lysenko I, Khoo M, Chey V K, Chung A C, Ewers R M. Mapping the structure of Borneo's tropical forests across a degradation gradient. Remote Sensing of Environment, 2016, 176: 84-97.
- [8] Han Z, Song W, Deng X Z, Xu X L. Grassland ecosystem responses to climate change and human activities within the Three-River Headwaters region of China. Scientific Reports, 2018, 8(1): 9079.
- [9] Wu R N, Cong W W, Li Y H, Li S Y, Wang D F, Jia Z Q, Wang F. The scientific conceptual framework for ecological quality of the dryland ecosystem: concepts, indicators, monitoring and assessment. Journal of Resources and Ecology, 2019, 10(2): 196-201.
- [10] Sekertekin A, Abdikan S, Marangoz A M. The acquisition of impervious surface area from LANDSAT 8 satellite sensor data using urban indices: a comparative analysis. Environmental Monitoring and Assessment, 2018, 190(7): 381.
- [11] Xu J X, Zhao H, Yin P C, Wu L X, Li G. Landscape ecological quality assessment and its dynamic change in coal mining area: a case study of

- Peixian. *Environmental Earth Sciences*, 2019, 78(24): 708.
- [12] Jing Y Q, Zhang F, He Y F, Kung H T, Johnson V C, Arikena M. Assessment of spatial and temporal variation of ecological environment quality in Ebinur Lake Wetland National Nature Reserve, Xinjiang, China. *Ecological Indicators*, 2020, 110: 105874.
- [13] 刘盼, 任春颖, 王宗明, 张柏, 陈琳. 南瓮河自然保护区生态环境质量遥感评价. *应用生态学报*, 2018, 29(10): 3347-3356.
- [14] Jaafari S, Sakieh Y, Shabani A A, Danehkar A, Nazarisamani A A. Landscape change assessment of reservation areas using remote sensing and landscape metrics (case study: Jajroud reservation, Iran). *Environment, Development and Sustainability*, 2016, 18(6): 1701-1717.
- [15] 朱青, 国佳欣, 郭熙, 徐喆, 丁徽, 韩逸. 鄱阳湖区生态环境质量的空间分异特征及其影响因素. *应用生态学报*, 2019, 30(12): 4108-4116.
- [16] 丁肇慰, 肖能文, 高晓奇, 郑华, 肖燧, 孔令桥, 欧阳志云, 李若男. 长江流域 2000—2015 年生态系统质量及服务变化特征. *环境科学研究*, 2020, 33(5): 1308-1314.
- [17] Leonardo V, Louise W, Lars H. Assessing the Capacity of Ecosystems to Supply Ecosystem Services Using Remote Sensing and An Ecosystem Accounting Approach. *Environmental Management*, 2019, 63(1): 1-15.
- [18] 潘竞虎, 董磊磊. 2001—2010 年疏勒河流域生态系统质量综合评价. *应用生态学报*, 2016, 27(9): 2907-2915.
- [19] 徐洁, 谢高地, 肖玉, 李娜, 江源, 陈文辉. 国家重点生态功能区生态环境质量变化动态分析. *生态学报*, 2019, 39(9): 3039-3050.
- [20] Xu K P, Chi Y Y, Wang J J, Ge R F, Wang X H. Analysis of the spatial characteristics and driving forces determining ecosystem quality of the Beijing-Tianjin-Hebei region. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28(10): 12555-12565.
- [21] Xu H Q, Wang Y F, Guan H D, Shi T T, Hu X S. Detecting ecological changes with a remote sensing based ecological index (RSEI) produced time series and change vector analysis. *Remote Sensing*, 2019, 11(20): 2345.
- [22] Shan W, Jin X B, Ren J, Wang Y C, Xu Z G, Fan Y T, Gu Z M, Hong C Q, Lin J H, Zhou Y K. Ecological environment quality assessment based on remote sensing data for land consolidation. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 239: 118126.
- [23] 刘立冰, 熊康宁, 任晓冬. 基于遥感生态指数的龙溪—虹口国家级自然保护区生态环境状况评估. *生态与农村环境学报*, 2020, 36(2): 202-210.
- [24] 杨绘婷, 徐涵秋. 基于遥感空间信息的武夷山国家级自然保护区植被覆盖度变化与生态质量评估. *应用生态学报*, 2020, 31(2): 533-542.
- [25] Liu C, Yang M H, Hou Y T, Zhao Y N, Xue X Z. Spatiotemporal evolution of island ecological quality under different urban densities: a comparative analysis of Xiamen and Kinmen Islands, southeast China. *Ecological Indicators*, 2021, 124: 107438.
- [26] 农兰萍, 王金亮. 基于 RSEI 模型的昆明市生态环境质量动态监测. *生态学杂志*, 2020, 39(6): 2042-2050.
- [27] 胡翔, 白文科, 董鑫. 四川省九寨沟县地震前后区域生态环境质量评价. *生态学杂志*, 2020, 39(3): 969-978.
- [28] Liao W H, Jiang W G. Evaluation of the spatiotemporal variations in the eco-environmental quality in China based on the remote sensing ecological index. *Remote Sensing*, 2020, 12(15): 2462.
- [29] 杨江燕, 吴田, 潘肖燕, 杜海童, 李金鹿, 张利, 门明新, 陈影. 基于遥感生态指数的雄安新区生态质量评估. *应用生态学报*, 2019, 30(1): 277-284.
- [30] 朱泓, 王金亮, 程峰, 邓欢, 张恩伟, 李应鑫. 滇中湖泊流域生态环境质量监测与评价. *应用生态学报*, 2020, 31(4): 1289-1297.
- [31] 赵伟华, 汤显强, 郭伟杰, 贡丹丹. 赤水河河长制水生态环境评估指标初探. *长江技术经济*, 2019, 3(1): 40-44.
- [32] Xia L, Song X N, Leng P, Wang Y W, Hao Y B, Wang Y F. A comparison of two methods for estimating surface soil moisture based on the triangle model using optical/thermal infrared remote sensing over the source area of the Yellow River. *International Journal of Remote Sensing*, 2019, 40(5/6): 2120-2137.
- [33] Yu Y H, Wang J L, Cheng F, Chen Y. Soil Moisture by Remote Sensing Retrieval in the Tropic of Cancer of Yunnan Province. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2020, 29(2): 1981-1993.
- [34] 郭焘, 于红博, 马梓策, 曹聪明. 基于 MODIS 的土壤含水量时空变化及干旱化程度分析. *水土保持研究*, 2019, 26(4): 185-189.
- [35] Zhou D C, Bonafoni S, Zhang L X, Wang R H. Remote sensing of the urban heat island effect in a highly populated urban agglomeration area in East China. *Science of the Total Environment*, 2018, 628-629: 415-429.
- [36] Zhang G Q, Yao T D, Xie H J, Qin J, Ye Q H, Dai Y F, Guo R F. Estimating surface temperature changes of lakes in the Tibetan Plateau using MODIS LST data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2014, 119(14): 8552-8567.
- [37] 卢慧婷, 黄琼中, 朱捷缘, 郑天晨, 严岩, 吴钢. 拉萨河流域生态系统类型和质量变化及其对生态系统服务的影响. *生态学报*, 2018, 38(24): 8911-8918.
- [38] 徐博轩, 陈报章, 许光, 陈婧, 车明亮. 基于叶面积指数估算植被总初级生产力. *生态学报*, 2016, 36(12): 3546-3555.
- [39] 刘索玄, 袁艳斌, 赵皞, 李倩. 基于遥感生态指数(RSEI)的水电开发区生态环境变化分析:以清江中下游地区为例. *生态与农村环境学报*, 2019, 35(11): 1361-1368.

- [40] Li Y, Yao N, Chau H W. Influences of removing linear and nonlinear trends from climatic variables on temporal variations of annual reference crop evapotranspiration in Xinjiang, China. *Science of the Total Environment*, 2017, 592: 680-692.
- [41] 周紫燕, 汪小钦, 丁哲, 陈芸芝, 汪传建. 新疆生态质量变化趋势遥感分析. *生态学报*, 2020, 40(9): 2907-2919.
- [42] 许幼霞, 周旭, 赵翠薇, 王罗娟, 赵娟. 1990—2015 年间贵州省植被生态环境质量变化特征. *地球与环境*, 2017, 45(4): 434-440.
- [43] 吴宜进, 赵行双, 奚悦, 刘慧, 李畅. 基于 MODIS 的 2006—2016 年西藏生态质量综合评价及其时空变化. *地理学报*, 2019, 74(7): 1438-1449.
- [44] 谢高地, 张昌顺, 张林波, 苏德, 曹淑艳, 冷允法, 肖玉. 保持县域边界完整性的中国生态区划方案. *自然资源学报*, 2012, 27(1): 154-162.
- [45] 宋美杰, 罗艳云, 段利民. 基于改进遥感生态指数模型的锡林郭勒草原生态环境评价. *干旱区研究*, 2019, 36(6): 1521-1527.
- [46] 孙瑞, 陈帮乾, 吴志祥, 兰国玉, 祁栋灵, 陶忠良, 杨川. 基于 Landsat 8 卫星影像的海南岛生态环境质量现状评价. *热带作物学报*, 2017, 38(9): 1587-1594.
- [47] 黄林峰, 田鹏举, 帅士章, 廖瑶, 刘芸. 2000—2016 年赤水河流域植被生态质量变化分析. *中低纬山地气象*, 2018, 42(5): 20-24.
- [48] 冉景丞, 蒙文萍. 贵州赤水河流域生态保护策略探讨. *贵州林业科技*, 2018, 46(1): 54-60.
- [49] 黄兴成, 李渝, 蒋天明, 江秋菊, 熊仕娟, 阳路芳. 贵州赤水河流域植被指数时空变异研究. *西南大学学报: 自然科学版*, 2020, 42(3): 139-145.
- [50] 赵卫权, 李威, 苏维词. 基于 GIS 与 RS 技术的赤水河流域生态风险评价——以仁怀市为例. *灌溉排水学报*, 2017, 36(9): 115-120.
- [51] Borgwardt F, Robinson L, Trauner D, Teixeira H, Nogueira A J A, Lillebø A I, Piet G, Kuemmerlen M, O'Higgins T, McDonald H, Arevalo-Torres J, Barbosa A L, Iglesias-Campos A, Hein T, Culhane F. Exploring variability in environmental impact risk from human activities across aquatic ecosystems. *Science of the Total Environment*, 2019, 652: 1396-1408.
- [52] 程志峰, 何祺胜. 基于 RSEI 的苏锡常城市群生态环境遥感评价. *遥感技术与应用*, 2019, 34(3): 531-539.
- [53] 程东亚, 李旭东. 西南山地流域林地和草地保护评价研究——以贵州赤水河流域为例. *水土保持研究*, 2019, 26(4): 328-335.
- [54] Miao C L, Sun L Y, Yang L. The studies of ecological environmental quality assessment in Anhui Province based on ecological footprint. *Ecological Indicators*, 2016, 60: 879-883.
- [55] Li X. Research on the technological progress, development of regional economic and ecological environment quality of Guizhou Province. *International Journal of Earth Sciences and Engineering*, 2016, 9(5): 2083-2088.
- [56] 李粉玲, 常庆瑞, 申健, 刘京. 黄土高原沟壑区生态环境状况遥感动态监测——以陕西省富县为例. *应用生态学报*, 2015, 26(12): 3811-3817.
- [57] Wang C J, Zhao H R. The assessment of Urban ecological environment in watershed scale. *Procedia Environmental Sciences*, 2016, 36: 169-175.
- [58] 张晓东, 刘湘南, 赵志鹏, 马彦云, 杨勇. 农牧交错区生态环境质量遥感动态监测——以宁夏盐池为例. *干旱区地理*, 2017, 40(5): 1070-1078.