

长江流域生态系统恢复力评价及其空间异质性研究

刘孝富, 张志苗*, 刘柏音, 王莹, 罗镭, 邱文婷

中国环境科学研究院, 北京 100012

摘要: 恢复力是生态系统的固有特征, 可通过系统遭受干扰后恢复到原稳定态的时间和速率来衡量. 开展长江流域生态系统恢复力研究对于掌握流域生态系统变化规律, 指导长江流域大保护和高质量发展具有重要意义. 该文采用概率衰减法评估长江流域生态系统恢复力, 首先获取了 2001—2020 年长江流域每 16 d 的 250 m 分辨率的增强型植被指数(enhanced vegetation index, EVI)数据, 采用最大值合成以及重采样技术, 获得年度 1 000 m 分辨率的 EVI 数据; 然后计算每个栅格 2000—2010 年、2001—2011 年、2001—2012 年直至 2001—2020 年共 11 年的 EVI 变化斜率; 以全流域为统计单元, 统计 11 年 EVI 变化斜率持续为正和持续为负的栅格数量, 采用衰减函数进行拟合, 正负衰减的时间差表征生态系统恢复力; 以 6 767 个小流域为对象, 分析长江流域生态系统恢复力的空间差异性. 结果表明: 20 年来长江流域整体 EVI 在逐渐增加, 空间分布差异在逐渐增大. 正、负衰减时间差为 29.48 年, 生态系统处于正向恢复状态. 生态系统恢复力呈现上游以及下游入海口低、中游地区高的特点, 其与降雨量、地形(海拔和坡度)、林草覆盖率和人类活动等因素相关, 在海拔 1 000~1 500 m、坡度 25°、林草覆盖率较大的山地区域生态系统恢复力最高; 而在高海拔或者低海拔地区以及植被覆盖较差的地区, 生态系统一旦受到干扰或破坏则较难恢复. 研究显示, 长江流域生态系统整体上呈正向演替, 得益于长江大保护的国策; 长三角地区因人类活动频繁, 生态处于逆向演替, 而上游地区如金沙江、大渡河、岷江一带生态系统恢复力较低, 与大型水电开发、地质灾害是否相关需进一步研究.

关键词: 长江流域; 生态系统恢复力; 植被指数; 空间异质性

中图分类号: X826

文章编号: 1001-6929(2022)00-00-00

文献标志码: A

DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2022.10.01

Assessment and Spatial Heterogeneity of Ecological Resilience in the Yangtze River Basin

LIU Xiaofu, ZHANG Zhimiao*, LIU Baiyin, WANG Ying, LUO Lei, QIU Wenting

Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

Abstract: Resilience is an inherent characteristic of ecosystems and can be measured by the time and rate at which the system returns to its original stable state after disturbance. It is of great significance to study on the ecosystem resilience of the Yangtze River Basin for mastering the law of ecosystem change and guiding the great protection and high-quality development of the Yangtze River Basin. In this paper, the probability attenuation method was used to assess the ecosystem resilience of the Yangtze River Basin. Firstly, the enhanced vegetation index (EVI) data of 250 m resolution every 16 d for the whole basin from 2001 to 2020 were obtained, and the annual EVI data of 1000 m resolution was obtained by maximum synthesis and resampling technology. Then the slope of EVI change for each grid was calculated for 11 years from 2000 to 2010, 2001 to 2011, 2001 to 2012 and 2001 to 2020. Taking the whole watershed as the statistical unit, the number of grids with continuous positive and continuous negative slopes in 11 years was counted, and the decay function was used to fit, and the time difference between positive and negative decay was used to represent the resilience of the ecosystem. The spatial differences of ecosystem resilience in the Yangtze River Basin were studied in 6767 small river basins. The results showed that the overall EVI in the Yangtze River Basin increased gradually in the past 20 years, and the spatial distribution difference has gradually increased. The time difference between positive and negative decay was 29.48 years, indicating that the ecosystem was in a positive recovery. The ecosystem resilience was lower in the upstream and downstream estuary and higher in the middle reaches, which was related to rainfall, topography (altitude and slope), forest and grass coverage, human activities and other factors. The ecosystem resilience was the highest in the mountain region with a slope of 25° and high vegetation coverage at an altitude of 1000-1500 m. However, in high-altitude and low-altitude areas with poor vegetation coverage, it

is difficult to recover the ecosystem once it is disturbed or damaged. The study have shown that the overall ecosystem of the Yangtze River basin is in a positive succession, thanks to the national policy of Yangtze River conservation. Due to frequent human activities, the ecology of the Yangtze River Delta is in reverse succession, while the ecosystem resilience of the upstream regions, such as Jinsha River, Dadu River and Minjiang River, is low, and whether it is related to large-scale hydropower development and geological disasters needs further study.

Keywords: the Yangtze River Basin; ecosystem resilience; vegetation index; spatial heterogeneity

收稿日期: 2022-06-10 修订日期: 2022-09-26

作者简介: 刘孝富(1983-), 男, 四川大竹人, 正高级工程师, 博士, 主要从事生态环境规划与评价、大数据分析研究, liuxf@craes.org.cn.

*责任作者: 张志苗(1988-), 女, 河北廊坊人, 助理研究员, 硕士, 主要从事环境数据挖掘、生态环境规划研究, zhangzm@craes.org.cn

基金项目: 长江生态环境保护修复联合研究(第一期)(No.2019-LHYJ-01)

Supported by Joint Study on Ecological Environment Protection and Restoration of Yangtze River (Phase I)(No.2019-LHYJ-01)

长江是中国和亚洲的第一大河、世界第三大河, 是中国水量最丰富的河流. 长江流域以其庞大的水系孕育了丰富的生态系统类型, 具有强大的水源涵养、生物繁育、释氧固碳等功能, 在防洪、供水、发电航运等方面取得了长足的发展, 在我国生态安全格局与社会经济发展中具有重要的战略地位. 习近平总书记提出了“要把修复长江生态环境摆在压倒性位置, 共抓大保护, 不搞大开发”的重大战略思想, 部署谋划了一系列长江保护与发展的重大战略事项, 体现了党中央对于保护好长江生态环境、永葆长江生机活力的高度重视. 长江的健康与安全关乎着中华民族的永续发展, 因此开展长江流域生态系统恢复力定量研究, 评估长江流域健康程度和生态系统稳定性十分必要.

恢复力表示物体在压力释放后的回弹, 也称之为弹性力, 从 20 世纪 70 年代开始被应用于自然系统^[1-2]、社会系统^[3-4]、经济系统^[5-6]以及复合生态系统^[7-8]. 在生态学领域, 有两个恢复力概念: 一是 Holling 恢复力, 其指系统吸收状态变量、驱动变量和参数变化并持续存在的能力, 这种“持续存在”表现为不发生状态转移和质的变化^[11]; 二是 Pimm 恢复力, 其指系统在遭受扰动后恢复到原有稳定态的速率或时间^[9]. 对恢复力的定性研究较多, 定量测算研究较少^[10], 主要源于恢复力直接衡量的难度大, 但是可以用系统中的某些属性来替代, 间接衡量恢复力, 这个替代的属性必须与系统恢复力相关而且能被衡量^[11-12]. Holling 恢复力需与特定的干扰联系起来, 识别干扰会对哪些参数产生影响, 构建响应关系, 识别临界减速的特征, 并将其与临界阈值连接起来, 这就决定了 Holling 恢复力评估更多停留在理论层面, 实践验证较少. 与 Holling 恢复力相比, Pimm 恢复力较易评价, 也更具有可操作性^[13-15]. 模糊评价法是 Pimm 恢复力应用最广的定量评价方法, 其是通过建立指标体系采用加权叠加方式求得恢复力综合指数的粗略模拟方法, 被广泛应用于植被^[16]、湿地^[17-18]、城市^[19-20]的系统恢复力评价, 但其评价指标主要依靠研究者的经验判断, 即使研究的案例区、指标相同, 也会因权重的不同而取得不一样的结果, 存在很强的主观性. 为了规避主观性的影响, Lanfredi 和 Simoniello 提出了利用植被覆盖的维持概率评价恢复力的方法^[21]. 概率衰减法评价相对模糊评价法具有较强的客观性, 无需主观筛选评价指标和确定权重, 避免了经验性误差; 而且数据易获取, 尺度可大可小, 评价过程可操作性强; 同时具备空间恢复力评估潜力, 可识别空间差异性, 已在意大利地中海区域^[21]以及中国汉江流域^[22]、汶川地震灾区^[23]进行了应用, 证明该方法应用于生态系统恢复力评价的可行性. 目前针对长江流域如此庞大生态系统的恢复力评价及影响因素研究仍相对薄弱, 因此该研究基于长时间序列的增强型植被指数(enhanced vegetation index, EVI)数据, 采用概率衰减法评估长江全流域及其小流域的生态系统恢复力, 识别生态系统恢复力的空间异质性, 研究生态系统恢复力的影响因素, 以为长江大保护和可持续发展提供技术决策支撑.

1 研究区域

长江流域面积约为 $180 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，自西向东流经青海省、四川省、西藏自治区、云南省、重庆市、湖北省、湖南省、江西省、安徽省、江苏省、上海市等 11 个省(自治区、直辖市)注入东海，流域植被类型主要以针叶林、阔叶林、栽培植被、灌丛、草甸和草丛为主。根据地形地貌、河流水系、行政区划等，将长江流域划分为通天河、金沙江、雅砻江、岷沱江、嘉陵江、长江上游(宜宾至宜昌)、长江中游(宜昌至湖口)、长江下游(湖口以下)、乌江、汉江、洞庭湖水系、鄱阳湖水系、太湖水系等 13 个二级流域，细化为 6 767 个小流域(见图 1)。



图 1 长江二级流域空间分布

Fig.1 Spatial distribution map of the second-level basins in the Yangtze River

2 技术方法

2.1 数据源与数据处理

该研究采用 MOD13Q1 产品 EVI 数据，EVI 较 NDVI 改进了可能由于大气或者植被生长地表所造成的误差。MOD13Q1 是搭载在 Terra 卫星上 MODIS 传感器生成的植被指数专题数据，投影方式为 Sinusoidal，空间分辨率 250 m，每隔 16 d 提供一期数据，即每月两期数据。该研究数据时间为 2001—2020 年，月时相为 1—12 月，每年数据 23 期，每期 8 景，共 3 680 景数据。数据来自美国地质调查局网站 (<http://landsweb.nascom.nasa.gov/data/search.html>)。

由于长江流域属亚热带湿润季风性气候，降雨量大，植被茂密，蒸腾作用强烈，常年云雾较多，单期 MODIS—EVI 数据可能因云量较大，可能对计算结果造成较大误差，因此该研究采用最大值合成方法来计算年 EVI [见式(1)]。

$$EVI_y = \max_{i=1 \sim 23} EVI_i \quad (1)$$

式中， EVI_y 为 y 年份的 EVI， EVI_i 为第 i 期的 EVI。

2.2 概率衰减法

2.2.1 基本原理

生态系统可以看作由若干“栅格”组成，每个栅格的 EVI 随时间的推移呈现增大或减小，斜率表现为正数或者负数。时间越长，栅格的 EVI 变化斜率始终维持为正或者维持为负的概率越低。降低的趋势可以采用指数衰减函数进行拟合，正负趋势衰减时间的差值可衡量生态系统恢复力。当正向衰减速率小于负向衰减概率时，生态系统恢复力较好，反之则较差，差值越大，表示生态系统恢复力越高。

2.2.2 技术方法

生态系统恢复力评价需包括时间段划分、栅格 EVI 变化斜率计算、斜率栅格表面计算、维持性栅格

表面计算、指数衰减拟合、生态系统恢复力计算等步骤.

2.2.2.1 时间段划分

首先将长时间序列的 EVI 划分为起始时段(t_0-t')和拟合时段($t'-t$), 拟合时段需有充分的样本数据来拟合衰减函数. 2010 年三峡水库蓄水到 175 m, 是长江流域生态系统变化过程中具有标志性的事件, 因此该研究将 2001—2010 年作为起始时段, 2011—2020 年作为拟合时段.

$$T(t_0, t) = T(t_0, t') \cup T(t', t) \quad (2)$$

式中: $T(t_0, t)$ 为研究时段, $T(t_0, t')$ 为起始时段, $T(t', t)$ 为拟合时段, t_0 为初始年, t' 为参考年.

2.2.2.2 栅格斜率计算

将长江流域划分为若干个 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 的栅格, 计算各栅格在初始年 t_0 到参考年 t' 以及初始年 t_0 到评估年 t_i 的 EVI 变化斜率. 以最小二乘法拟合各栅格参考时段内 EVI 的变化线, 斜率的计算公式:

$$Slope = \frac{\sum_{i=0}^t (t_i - \bar{t})(EVI_i - \overline{EVI})}{\sum_{i=0}^t (t_i - \bar{t})^2} \quad (3)$$

式中, Slope 为斜率, $\overline{EVI}$ 为评估年际 EVI 平均值.

2.2.2.3 斜率栅格表面计算

根据栅格的 EVI 变化斜率来计算各年份斜率栅格表面 S , 即当栅格的 EVI 变化斜率(Slope)为正时, 将斜率栅格表面赋值为 1; 当栅格的 EVI 变化斜率为负时, 斜率栅格表面赋值为-1.

$$S(t_i) = \begin{cases} -1, \wedge Slope < 0 \\ 1, \wedge Slope > 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中, $S(t_i)$ 为评估年的斜率栅格表面.

2.2.2.4 维持性栅格表面计算

根据各年份的斜率栅格表面计算维持性栅格表面 P . 参考年的维持性栅格表面与斜率栅格表面相同. 将某年的斜率栅格表面与上一年的维持性栅格表面进行比较, 如果栅格值相等, 则该栅格的维持性栅格表面赋值与上一年相同, 反之则赋为 0.

$$P(t_i) = \begin{cases} S(t'), \wedge t = t' \\ P(t_{i-1}), \text{if } S(t_i) = P(t_{i-1}), t > t' \\ 0, \text{if } S(t_i) \neq P(t_{i-1}), t > t' \end{cases} \quad (5)$$

式中, $P(t_i)$ 为评估年维持性栅格表面, $P(t_{i-1})$ 为上一年维持性栅格表面, $S(t_i)$ 为评估年的斜率栅格表面, $S(t')$ 为参考年的斜率栅格表面.

2.2.2.5 指数衰减拟合

以参考年维持性栅格数量(N_t)为基准, 将其余年份维持性栅格数量(N_{t_i})进行归一化, 即计算各年维持性栅格数量占参考年维持性栅格数量的比例 [$q(t_i)$]. 采用指数衰减函数拟合维持性栅格比例随时间($t'-t$)下降的趋势, 计算得到衰减时间 τ . 计算公式如下:

$$q(t_i) = \frac{N_{t_i}}{N_t} \quad (6)$$

$$q(t_i) = A e^{-(t_i - t')/\tau} \quad (7)$$

式中： τ 为趋势衰减时间， a ； A 为常数。

2.2.2.6 生态系统恢复力计算

某趋势衰减时间越长，表示维持该变化趋势的概率越高。生态系统恢复力(RS)是通过正趋势衰减时间(τ_p)与负趋势衰减时间(τ_n)的差值来衡量，当正趋势的衰减时间大于负趋势时，表明该生态系统的恢复力好；反之生态系统恢复力差。计算公式如下：

$$RS = \tau_p - \tau_n \tag{8}$$

3 结果与讨论

3.1 长江全流域生态系统恢复力

3.1.1 EVI 年际变化

长江流域 EVI 的年际变化趋势和空间分布特征(见图 2)表明，2001—2020 年长江流域平均 EVI 总体呈增加趋势，增幅为 7.76%，说明长江流域植被覆盖总体在逐渐变好。2001 年的 EVI 最小，仅为 0.49；EVI 峰值出现在 2016 年，达到 0.536，之后又稍有降低，2020 年为 0.532。随着时间的推移，EVI 的标准差也在逐渐增加，说明长江流域植被覆盖空间分布差异在逐渐增大。长江流域植被覆盖呈现西部低、中部较高的空间分布规律，EVI 较高的地区主要为四川省、贵州省、湖南省、湖北省等地，长江入海口区域 EVI 在逐渐变小。

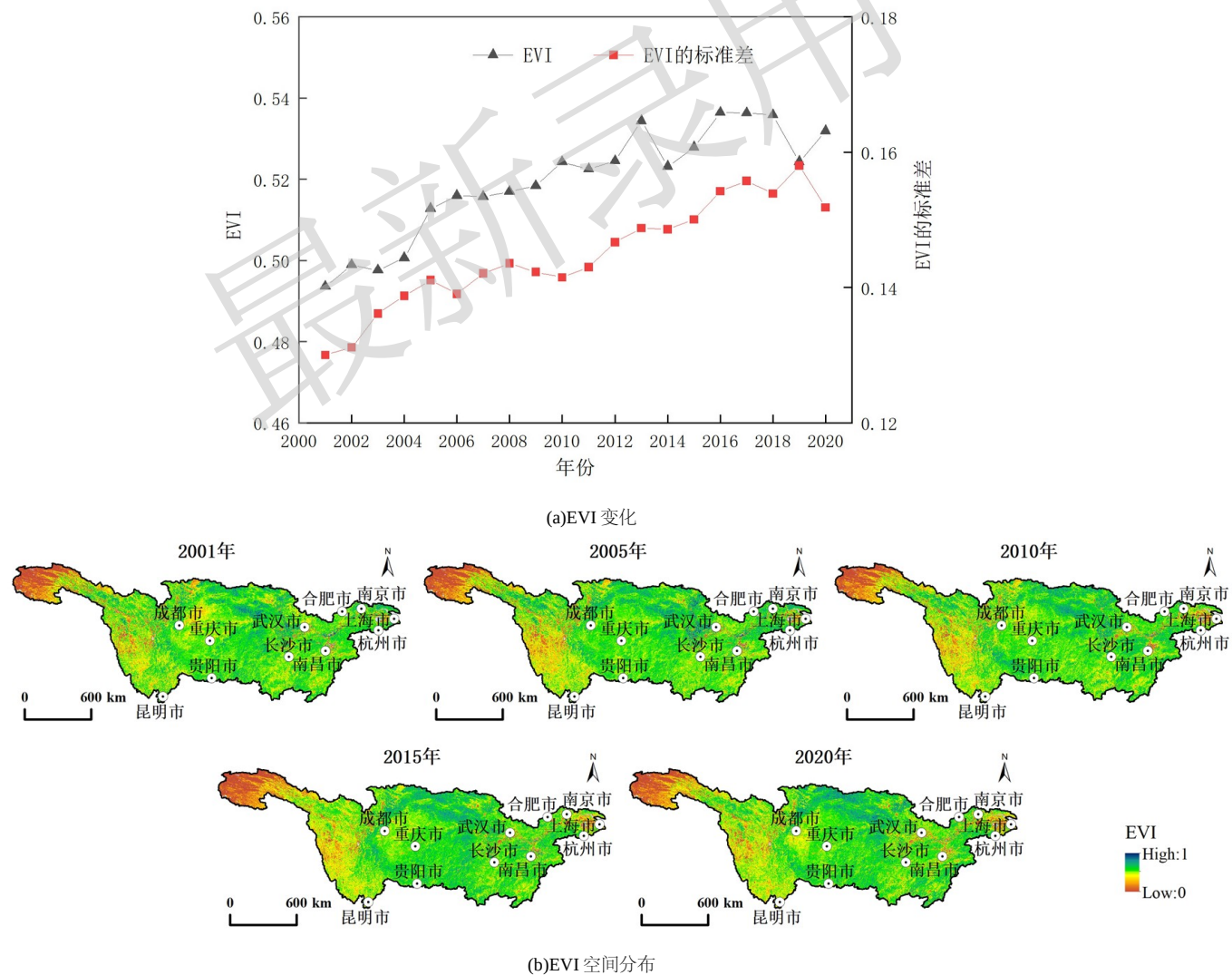


图 2 2001—2020 年长江流域平均 EVI 变化及空间分布
Fig.2 Variation of average EVI and spatial distribution in the Yangtze River Basin from 2001 to 2020

3.1.2 维持性栅格数量变化

统计 2010—2020 年维持正、负趋势的栅格数量，计算各年份维持性栅格数量占 2010 年维持相同趋势栅格数量的比例(见表 1)。数据表明，2010 年，维持正趋势的栅格数量占全流域的比例为 77.3%，维持负趋势的栅格数量占全流域的 22.7%。随着时间的推移，维持负趋势栅格数量减幅较大，下降速率快，2020 年维持负趋势栅格数量仅为 2010 年的 33.82%；而维持正趋势栅格数量占 2010 年的 76.58%，说明长江流域植被整体上维持着正向演替。

表 1 2001—2020 年长江流域 EVI 维持正、负趋势的栅格数量统计

Table 1 Statistics of the number of EVI maintained grid with positive and negative trends in the Yangtze River basin from 2001 to 2020

年份	斜率维持正的栅格		斜率维持负的栅格	
	数量	比例/%	数量	比例/%
2010	1 376 924	100.00	404 827	100.00
2011	1 301 536	94.52	312 989	77.31
2012	1 251 191	90.87	268 601	66.35
2013	1 221 911	88.74	230 983	57.06
2014	1 186 519	86.17	210 595	52.02
2015	1 148 676	83.42	193 284	47.74
2016	1 122 128	81.50	175 659	43.39
2017	1 101 464	79.99	163 889	40.48
2018	1 083 360	78.68	153 380	37.89
2019	1 070 524	77.75	144 596	35.72
2020	1 054 459	76.58	136 925	33.82

采用空间分析方法将 2010—2020 年维持性栅格进行叠加，得出每个栅格在 11 个年份中维持同一趋势的次数(见图 3)。维持正趋势的年份次数越多(绿色越深)表明维持正趋势时间越长，维持正趋势时间长的栅格主要分布在陕西省的安康市、商洛市，湖北省的十堰市，以及重庆市的城口县、巫溪县、巫山县、奉节县等区域；维持负趋势的年份次数越多(红色越深)表明维持负趋势时间越长，维持负趋势时间长的栅格主要分布在上海市，江苏省的苏州市、无锡市、常州市、镇江市、南京市，四川省的成都市，以及浙江省的湖州市、嘉兴市等区域。



图 3 2001—2020 年长江流域栅格维持趋势的时间

Fig.3 Time of grid maintaining trend in the Yangtze River Basin from 2001 to 2020

3.1.3 生态系统恢复力

以 2010—2020 年维持正、负趋势栅格数量占参考时刻比例为纵坐标,时间为横坐标,拟合趋势衰减曲线得到:正趋势的衰减时间为 38.02 年,负趋势的衰减时间为 8.54 年,差值为 29.48 年,表明长江流域在 2010 年之前的干扰状态下,随着时间推移整体在逐渐恢复。

3.2 分流域生态系统恢复力

统计长江流域 6 767 个小流域各年维持不同趋势的栅格数量,计算各年每个小流域维持性栅格数量占 2010 年维持相同趋势栅格数量的比例,拟合正负趋势衰减曲线,得到各小流域生态系统恢复力.由于小流域数量多、面积小,每个小流域包含的栅格数量较少,拟合时可能出现一些结果异常情况,采取如下处理方法:①有些小流域在 2010—2020 年维持正、负趋势栅格的比例保持不变,衰减时间将呈现无限大,对该小流域做出标记;②某些小流域仅存在维持正趋势或维持负趋势的栅格,即以维持该趋势栅格数量衰减时间为生态系统恢复力;③对于无统计值的小流域或正负趋势衰减时间均为无穷大的小流域则标记出来。

综合考虑长江各小流域的生态系统恢复力大小范围、排序情况、数量占比等,根据自然断点法原理,结合相关研究结果^[22],将长江小流域生态系统恢复力划分为 5 个等级(见表 2).结果表明,长江流域生态系统恢复力大于 0 的小流域面积为 $141.50\times10^4\text{ km}^2$,占流域总面积的 81.64%,说明长江流域大部分区域生态系统为正向演替.生态系统恢复力等级为一般和较好的小流域较多,分别占流域总面积的 47.58%、24.6%;生态系统恢复力极好的小流域面积为 $16.41\times10^4\text{ km}^2$,占流域总面积的 9.47%;生态系统恢复力极差的小流域面积为 $1.84\times10^4\text{ km}^2$,仅占流域总面积的 1.06%。

表 2 长江小流域生态系统恢复力等级划分

Table 2 Classification of ecological resilience in the Small watershed of the Yangtze River

范围	生态恢复力等级	面积/km ²	占比/%
RS>500	极好	164 060.30	9.47
100<RS≤500	较好	426 368.37	24.60
0<RS≤100	一般	824 586.06	47.58
-100<RS≤0	较差	299 776.07	17.30
RS≤-100	极差	18 425.86	1.06

根据长江小流域生态系统恢复力空间分布(见图 4)得出,生态系统恢复力高的小流域集中在长江流域中部地区,主要分布在嘉陵江、汉江上游、长江上游(宜宾至宜昌段)、乌江流域、洞庭湖水系、鄱阳湖水系等二级流域,尤其是陕西省的安康市、商洛市,甘肃省的陇南市,四川省的广元市,湖北省的神农架林区、恩施土家族苗族自治州,湖南省的张家界市、湘西土家族苗族自治州、永州市、怀化市,广西壮族自治区的桂林市,江西省的吉安市、赣州市、抚州市、景德镇市,以及安徽省的黄山市等区域生态系统恢复力较好,正负趋势的衰减时间差最高可达 13 628 年;生态系统恢复力差的小流域分布在太湖水系、长江下游(湖口以下)、金沙江、岷沱江等流域,主要是四川省的成都市、眉山市、自贡市,青海省的玉树藏族自治州,江苏省的南通市、泰州市、常州市、镇江市、苏州市、南京市,浙江省的嘉兴市、湖州市、上海市,安徽省芜湖市、马鞍山市,以及潜江市、孝感市、武汉市、鄂州市、长沙市、合肥市、长沙市等市级驻地,正负趋势的衰减时间差最低可以达到 -838 年.长江流域生态系统恢复力总体上呈现中部高、东部和西部低的特点,长江流域源头区和长江入海口区域生态系统恢复力较差。

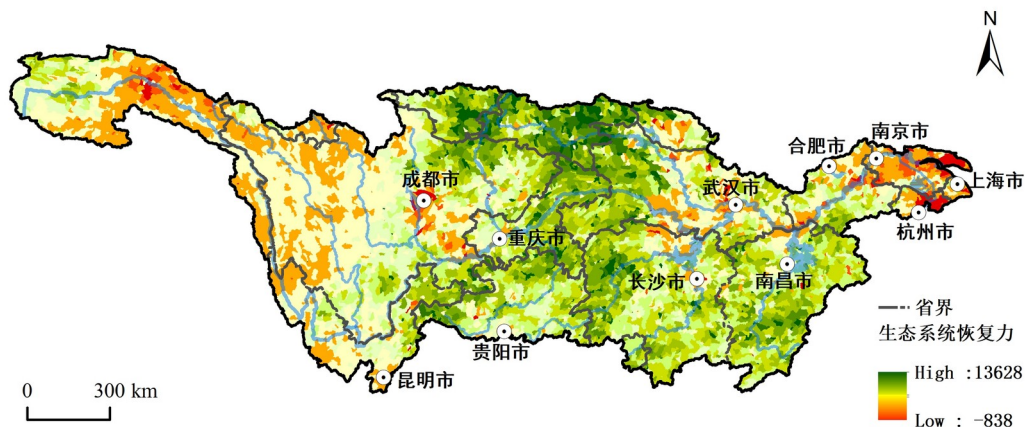


图 4 长江小流域生态系统恢复力空间分布

Fig.4 Spatial distribution of ecological resilience in the Small watershed of the Yangtze River

3.3 讨论

3.3.1 长江流域生态系统恢复力分析

从时间尺度上看, 2001—2020 年长江流域整体上 EVI 呈增加趋势, EVI 维持下降趋势的栅格减少速率较快, 长江流域整体植被覆盖正向演替趋势明显, 该结论与相关研究结果^[24-27]一致. 从空间尺度上看, 植被覆盖空间分布差异性在逐渐增大, 植被覆盖维持上升趋势的栅格主要分布在汉江上游、长江上游(宜宾至宜昌)、乌江中下游、洞庭湖水系上游来水区域, 集中在陕西省的安康市、商洛市, 湖北省的十堰市、重庆市的城口县、巫溪县、巫山县、奉节县等地; 植被覆盖保持下降趋势的栅格主要分布在太湖水系以及岷沱江流域中下游, 如上海市, 江苏省苏州市、无锡市、常州市, 四川省成都市等区域, 该研究结果在相关研究^[22-24,27-31]中已有印证.

长江流域生态系统恢复力为正的流域面积占流域总面积的 81.64%, 说明长江流域大部分区域生态系统具有一定的稳定性, 为正向变化趋势. 生态系统恢复力较好的小流域分布与植被覆盖持续变好区域基本重叠, 集中在汉江上游、长江上游(宜宾至宜昌段)等区域, 表明良好的生态环境基础为生态系统稳定性提供了保障. 太湖水系的南通市、嘉兴市, 以及成都市、眉山市、芜湖市等地区生态系统恢复力差, 这些地区主要位于成渝经济圈、长江三角洲经济圈, 经济发展水平较高, 城市化进程快, 说明人类的高强度干扰对生态系统恢复力有较大影响, 若干扰到一定程度生态系统将发生逆转^[32-35]. 该研究揭示了长江流域生态系统恢复力空间分布差异, 可为流域生态系统保护、环境治理与经济发展协同管理提供参考. 因此, 长江流域下游省市在国土开发过程中要重视生态环境保护和修复, 开展综合性、针对性、差异性管控^[36-37].

3.3.2 生态系统恢复力空间异质性分析

针对长江流域生态系统恢复力的空间差异性, 深入分析其影响因素. 参考李观凤等学者^[7,32,38]对于生态系统脆弱性和恢复力驱动因子的分析结果, 该研究以长江流域 6 767 个小流域为对象, 分析小流域生态系统恢复力与降雨量、地形、植被覆盖、人类活动等因素之间的相关性, 判断各因素对生态系统恢复力的影响情况.

3.3.2.1 降雨量的异质性

分析长江小流域生态系统恢复力与 2013—2020 年多年平均降雨量以及降雨量变化之间的关系(见图 5), 发现年降雨量在 800~1 200 mm 范围内的小流域, 生态系统恢复力较高; 年降雨量<1 200 mm 时, 随着降雨量增大, 生态系统恢复力总体呈增加趋势; 降雨量>1 200 mm 后, 生态系统恢复力有所减小. 生态系统恢复力与降雨量变化斜率之间无明显相关特征规律.

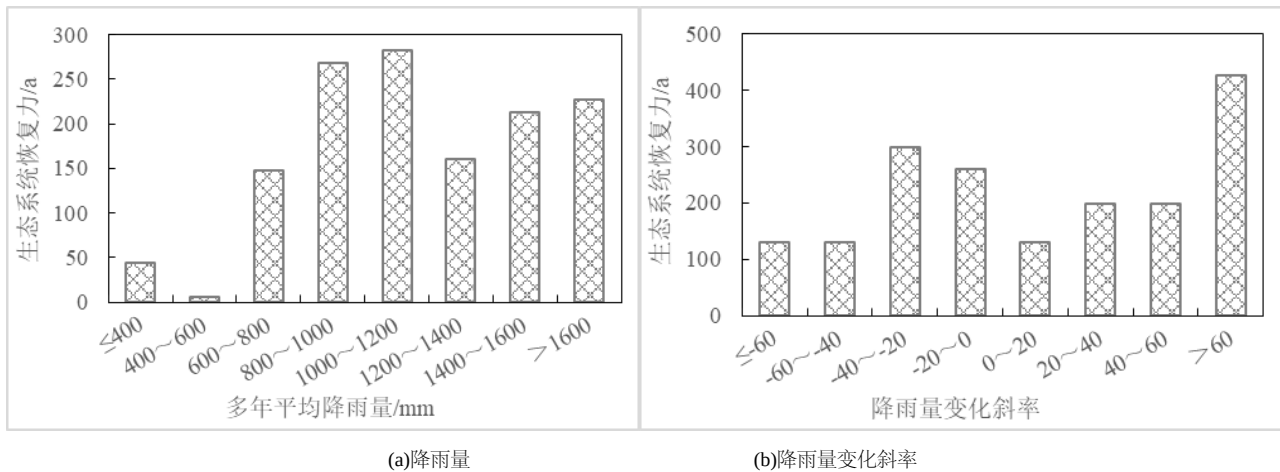


图5 长江小流域生态系统恢复力与多年平均降雨量、年降雨变化斜率的关系

Fig.5 Relationship between ecological resilience and perennial mean rainfall and annual rainfall variation slope in the Small watershed of the Yangtze River

3.3.2.2 地形异质性

分析小流域生态系统恢复力与平均海拔、平均坡度的关系(见图6)发现,随着海拔升高,生态系统恢复力呈先增大后减小的趋势,海拔在1000~1500 m范围内的小流域生态系统恢复力最好.海拔低于1000 m时,随着海拔升高,生态系统恢复力趋向于升高;海拔高于1000 m后,随着海拔升高,生态系统恢复力趋于降低.坡度 $\leq 30^\circ$ 时,随着坡度增大,生态系统恢复力呈增加趋势,坡度高于 30° 时生态系统恢复力有所下降,坡度在 $25^\circ \sim 30^\circ$ 范围内的小流域生态系统恢复力最大.

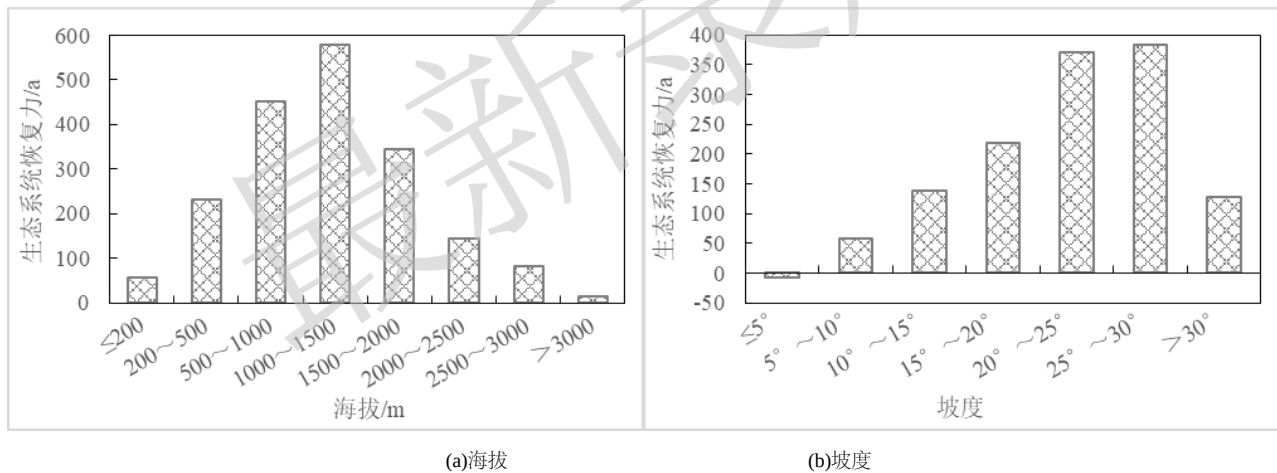


图6 长江小流域生态系统恢复力与平均海拔、平均坡度的关系

Fig.6 Relationship between ecological resilience and average elevation and average slope in the Small watershed of the Yangtze River

3.3.2.3 植被覆盖异质性

以林草覆盖率表征小流域植被覆盖特征,分析长江小流域生态系统恢复力与植被覆盖之间的关系(见图7),发现生态系统恢复力随着林草覆盖率的增大而升高.

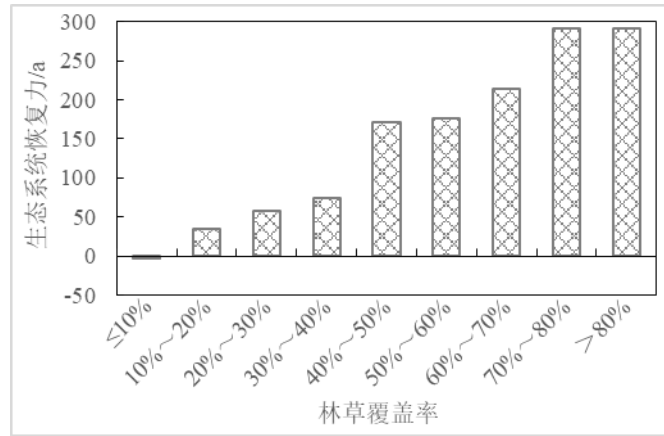


图7 长江小流域生态系统恢复力与林草覆盖率的关系

Fig.7 Relationship between ecological resilience and perennial mean vegetation index in the Small watershed of the Yangtze River

3.3.2.4 人类活动异质性

以建设用地占比表征小流域人类活动强度，分析长江小流域生态系统恢复力与人类活动之间的相关性(见图8)，建设用地占比在10%以上时，小流域生态系统恢复力随着建设用地占比增大而减小，说明生态系统恢复力会受人类活动的影响。

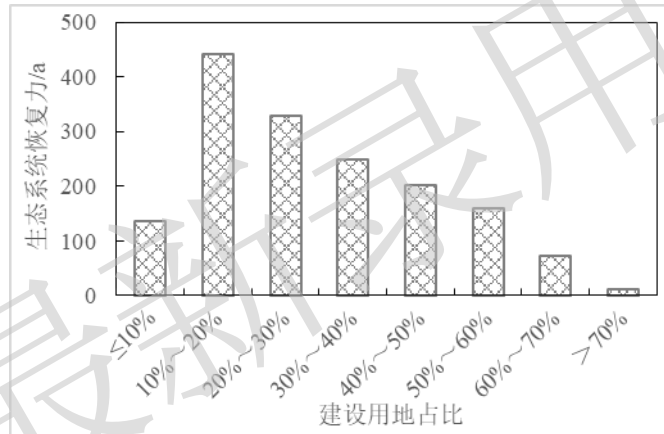


图8 长江小流域生态系统恢复力与建设用地占比关系图

Fig.8 Relationship between ecological resilience and proportion of construction land in the small watershed of the Yangtze River

通过以上影响因素分析结果发现，生态系统恢复力与降雨量、地形(海拔、坡度)、植被覆盖、人类活动都有一定的相关性，生态系统恢复力随坡度、林草覆盖率的升高而增大，随人类活动强度的增大而减小，随海拔的增加呈先增大后减小的趋势。该研究表明，生态系统恢复力的影响因素存在明显的时空差异，海拔在1000~1500 m、坡度在20°~30°、年降雨量在1000~1200 mm的小流域生态系统恢复力较高，证明生态系统恢复力是受多种驱动因素综合影响，不同区域内影响因素的作用强度和波动方向各不相同。空间异质性分析也从侧面验证了小流域生态系统恢复力的空间分布特征，在长江入海口上海市、江苏省等地海拔较低平、降水充沛、植被较少，土地多样化程度高，城镇化建设快速的地区生态系统恢复力相对较低。

4 结论

a) 2001—2020年，长江流域整体上EVI呈上升趋势，生态环境呈正向变化，植被覆盖的空间差异性在逐渐增大。长江流域上游植被覆盖一直较少，且改善程度不明显；长江入海口部分区域植被覆盖率总体呈减小趋势。

b) 长江流域内81.64%的区域生态系统表现为稳定向好的状态。长江流域生态系统恢复力呈现空间分布不均匀的特征，总体上中部高、东部和西部低，长江入海口部分地区生态系统恢复力较差。生态系统恢

复力受地形(海拔、坡度)、植被覆盖、人类活动、降雨量的影响,生态系统恢复力与坡度、林草覆盖率均呈正相关,与人类活动呈负相关,与海拔呈抛物型相关.长江流域生态系统恢复力受多种驱动因素的综合影响,在上、中、下游既有一定程度的相似性又存在显著的差异,其空间不一致性与生态系统的自然条件有关.

c) 长江流域生态系统整体上呈正向演替,特别是汉江流域,这得益于长江大保护以及丹江口水源地的保护,无论从国家政策还是相关人员的研究都可以得到印证.生态系统恢复力最低值出现在长江下游及入海口区,这些区域人类干扰强度大,生态系统稳定性差,在开发过程中要特别重视生态保护与修复避免产生生态倒退的不可逆现象.上游地区如金沙江、大渡河、岷江一带生态恢复力较低,是否与大型水电开发、地震及地质灾害相关,需进一步研究.

参考文献(References):

- [1] HOLLING C S. Resilience and stability of ecological systems[J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1973, 4: 1-23.
- [2] WOHLGEMUTH T, MORETTI M, CONEDERA M, et al. Ecological resilience after fire in mountain forests of the Central Alps[J]. *Forest Ecology and Management*, 2006, 234: S200.
- [3] OSTROM E. A diagnostic approach for going beyond panaceas[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2007, 104(39): 15181-15187.
- [4] NORBERG J, WILSON J, WALKER B, et al. Diversity and resilience of social-ecological systems[M]. New York: Columbia University Press, 2008.
- [5] ÖSTH J, REGGIANI A, GALIAZZO G. Spatial economic resilience and accessibility: a joint perspective[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2015, 49: 148-159.
- [6] COWELL M M. Bounce back or move on: regional resilience and economic development planning[J]. *Cities*, 2013, 30: 212-222.
- [7] 李观凤, 焦华富, 王群. 干旱区文化旅游地社会-生态系统恢复力年际变化及影响因素: 以甘肃省敦煌市为例[J]. *干旱区地理*, 2022, 45(3): 935-945.
- [8] LI G F, JIAO H F, WANG Q. Interannual variation and influencing factors of social-ecological system resilience of cultural tourism destination in arid area: a case of Dunhuang City, Gansu Province[J]. *Arid Land Geography*, 2022, 45(3): 935-945.
- [9] LI Y F, SHI Y L, QURESHI S, et al. Applying the concept of spatial resilience to socio-ecological systems in the urban wetland interface[J]. *Ecological Indicators*, 2014, 42: 135-146.
- [10] PIMM S L. The complexity and stability of ecosystems[J]. *Nature*, 1984, 307(5949): 321-326.
- [11] 战金艳, 闫海明, 邓祥征, 等. 森林生态系统恢复力评价: 以江西省莲花县为例[J]. *自然资源学报*, 2012, 27(8): 1304-1315.
- [12] ZHAN J Y, YAN H M, DENG X Z, et al. Assessment of forest ecosystem resilience in Lianhua County of Jiangxi Province[J]. *Journal of Natural Resources*, 2012, 27(8): 1304-1315.
- [13] CARPENTER S R, WESTLEY F, TURNER M G. Surrogates for resilience of social-ecological systems[J]. *Ecosystems*, 2005, 8(8): 941-944.
- [14] WALKER B, SALT D. Resilience Thinking[M]. Washington DC: Island Press, 2006.
- [15] REGGIANI A, de GRAAFF T, NIJKAMP P. Resilience: an evolutionary approach to spatial economic systems[J]. *Networks and Spatial Economics*, 2001, 2: 211-229.
- [16] EBISUDANI M, TOKAI A. Resilience: ecological and engineering perspectives present status and future consideration referring on two case studies in U.S.[C]. Kyoto, Japan: The Society for Risk Analysis, 2014.
- [17] LIU X F, JIANG W G, LI J, et al. Evaluation of the vegetation coverage resilience in areas damaged by the Wenchuan earthquake based on MODIS-EVI data[J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2017, 17(2): 259.
- [18] BISSON M, FORNACIAI A, COLI A, et al. The vegetation resilience after fire (VRAF) index: development, implementation and an illustration from central Italy[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2008, 10(3): 312-329.
- [19] van LONKHUYZEN R A, LAGORY K E, KUIPER J A. Modeling the suitability of potential wetland mitigation sites with a geographic information system[J]. *Environmental Management*, 2004, 33(3): 368-375.
- [20] 胡文秋. 基于 RS 和 GIS 的退化湿地生态系统恢复力研究: 以黄河三角洲湿地为例[D]. 济南: 山东师范大学, 2013.

- [19] CUTTER S L, BARNES L, BERRY M, et al. A place-based model for understanding community resilience to natural disasters[J]. *Global Environmental Change*, 2008, 18(4): 598-606.
- [20] 李湾湾. 西南中心城市生态健康评价模型分析与演变变化[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2021.
- [21] LANFREDI M, SIMONIELLO T, MACCHIATO M. Temporal persistence in vegetation cover changes observed from satellite: development of an estimation procedure in the test site of the Mediterranean Italy[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 93(4): 565-576.
- [22] 张志苗, 刘孝富, 邱文婷, 等. 基于植被指数开展汉江流域生态恢复力评估研究[J]. *环境工程技术学报*, 2022, 12(2): 436-442.
- ZHANG Z M, LIU X F, QIU W T, et al. Evaluation of ecological resilience of Hanjiang River Basin based on vegetation index[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2022, 12(2): 436-442.
- [23] LIU X F, JIANG W G, Li J, et al. Evaluation of the vegetation coverage resilience in areas damaged by the Wenchuan earthquake based on MODIS-EVI data[J]. *Sensors*, 2017, 17(2).
- [24] 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.
- XU Y, ZHENG Z W, GUO Z D, et al. Dynamic variation in vegetation cover and its influencing factor detection in the Yangtze River Basin from 2000 to 2020[J]. *Environmental Science*, 2022, 43(7): 3730-3740.
- [25] 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.
- LIU L D, LI J, LIU C X, et al. Analysis on the characteristics of temporal and spatial changes and influencing factors of vegetation coverage in the Yangtze River economic belt from 2000 to 2015[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, 28(6): 330-336.
- [26] 袁喆, 喻志强, 冯兆洋, 等. 长江流域陆地生态系统 NDVI 时空变化特征及其对水热条件的响应[J]. *长江科学院院报*, 2019, 36(11): 7-15.
- YUAN Z, YU Z Q, FENG Z Y, et al. Spatiotemporal variations of NDVI in terrestrial ecosystem in Yangtze River Basin and response to hydrothermal condition[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2019, 36(11): 7-15.
- [27] 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, 33(12): 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, 33(12): 2084-2097.
- [28] 石悦樾, 银正彤, 郑文锋. 基于 MODIS 数据乌江流域植被覆盖变化与气候变化关系研究[J]. *林业资源管理*, 2017(1): 127-134.
- SHI Y Y, YIN Z T, ZHENG W F. Study on the response of vegetation cover change and climate change in Wujiang River Basin based on MODIS data[J]. *Forest Resources Management*, 2017(1): 127-134.
- [29] 冯磊, 杨东, 黄悦悦. 2000—2017 年川渝地区植被 NDVI 特征及其对极端气候的响应[J]. *生态学杂志*, 2020, 39(7): 2316-2326.
- FENG L, YANG D, HUANG Y Y. Vegetation NDVI characteristics and response to extreme climate in Sichuan and Chongqing from 2000 to 2017[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, 39(7): 2316-2326.
- [30] 邓元杰, 姚顺波, 侯孟阳, 等. 长江流域中上游植被 NDVI 时空变化及其地形分异效应[J]. *长江流域资源与环境*, 2020, 29(1): 66-78.
- DENG Y J, YAO S B, HOU M Y, et al. Temporal and spatial variation of vegetation NDVI and its topographic differentiation effect in the middle and upper reaches of the Yangtze River Basin[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2020, 29(1): 66-78.
- [31] 丁肇慰, 肖能文, 高晓奇, 等. 长江流域 2000—2015 年生态系统质量及服务变化特征[J]. *环境科学研究*, 2020, 33(5): 1308-1314.
- DING Z W, XIAO N W, GAO X Q, et al. Changes of ecosystem quality and services between 2000 and 2015 in Yangtze River Basin[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, 33(5): 1308-1314.
- [32] 张正昱, 金贵, 郭柏枢, 等. 基于多准则决策的长江经济带国土空间脆弱性与恢复力研究[J]. *自然资源学报*, 2020, 35(1): 95-105.
- ZHANG Z Y, JIN G, GUO B S, et al. Research on the spatial vulnerability and resilience of land in the Yangtze River Economic Belt based on multi-criteria decision[J]. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(1): 95-105.
- [33] 李东旭. 基于层次分析法的我国大河三角洲脆弱性评价模型研究[D]. 东营: 中国石油大学(华东), 2012.
- [34] 金丽娟, 许泉立. 基于 SRP 模型的四川省生态脆弱性评价[J]. *生态科学*, 2022, 41(2): 156-165.
- JIN L J, XU Q L. Ecological vulnerability assessment of Sichuan Province based on SRP model[J]. *Ecological Science*, 2022, 41(2): 156-165.
- [35] 乔青, 高吉喜, 王维, 等. 生态脆弱性综合评价方法与应用[J]. *环境科学研究*, 2008, 21(5): 117-123.
- QIAO Q, GAO J X, WANG W, et al. Method and application of ecological fragility assessment[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2008, 21(5): 117-123.
- [36] 杨荣金, 孙美莹, 傅伯杰, 等. 长江流域生态系统可持续管理策略[J]. *环境科学研究*, 2020, 33(5): 1091-1099.
- YANG R J, SUN M Y, FU B J, et al. Sustainable management strategy of ecosystems in the Yangtze River Basin[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, 33(5): 1091-1099.
- [37] 李云生, 王浩, 王昕站, 等. 长江流域生态环境治理的瓶颈及对策分析[J]. *环境科学研究*, 2020, 33(5): 1262-1267.
- LI Y S, WANG H, WANG X H, et al. Analysis of bottlenecks and countermeasures of ecological environment governance in Yangtze River

Basin[J].Research of Environmental Sciences,2020,33(5):1262-1267.

[38] 刘婷.攀枝花市生态环境脆弱性时空格局变化及驱动力分析[D].成都:成都理工大学,2019.

最新录用