

DOI: 10.20103/j.stxb.202403070463

杨渺, 侯鹏, 翟俊, 蔡明勇, 林乃峰, 吴瑕. 基于期望增长的四川省生态保护修复成效评估方法. 生态学报, 2025, 45(2): 586–595.

Yang M, Hou P, Zhai J, Cai M Y, Lin N F, Wu X. Research on the evaluation method of ecological protection and restoration effectiveness in Sichuan Province based on expected growth. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(2): 586–595.

基于期望增长的四川省生态保护修复成效评估方法

杨 渺^{1,*}, 侯 鹏², 翟 俊², 蔡明勇², 林乃峰³, 吴 瑕¹

1 四川省生态环境科学研究院, 成都 610041

2 生态环境部卫星环境应用中心, 北京 100094

3 生态环境部南京环境科学研究所, 南京 210042

摘要: 生态保护修复成效评估是新时期生态文明建设绩效考核的需要, 也是国际生态学领域面临的挑战和前沿课题。为科学评估生态保护修复成效, 克服现有功能指标及指标阈值设置缺陷, 在分析了 2010—2020 年四川省植被覆盖度 (FVC)、叶面积指数 (LAI) 变化趋势、空间聚集特征基础上, 从空间、时间两个维度确立了植被功能性状 5 个特征区, 制定了期望得分标准值表, 开展了基于期望增长的保护成效评估。结果表明: (1) 2010—2020 年四川省 FVC、LAI 总体呈增长趋势, 增长模式空间分异契合四川省川西高原气候区和东部中亚热带气候区大体二分气候框架, 也与四川省地带性植被分布相对应。FVC、LAI 增长极低值区 ($P < 0.01$) 基本位于川西北高原山地, 阿坝州和甘孜州境内。在四川东部中亚热带气候区内, 盆缘山地常绿阔叶林和川西南山地常绿阔叶林的 FVC、LAI 处于增长高值区。两者在四川盆地农业植被区、西南山地等区域的不同增长表现, 体现了气候、地带性植被, 以及人类活动等因素综合作用的结果, 以及 FVC、LAI 对上述综合作用的差异化响应。(2) 2021—2022 年四川省 LAI 期望得分 (LAI-Kq) 基本维持稳定, FVC 期望得分 (FVC-Kq) 总体稳定 ($P > 0.05$), 有各别市下降明显 ($P < 0.05$), 四川省生态保护成效等级为基本稳定。(3) 对于不同保护强度的区域来说, 2021—2022 年, 生态保护红线内 FVC-Kq 低于生态保护红线外, 生态保护红线内属于保护地的区域 FVC-Kq 小于保护地外区域。生态保护红线内外, 以及生态保护红线内不同保护强度区域对于 LAI-Kq 影响较小。(4) FVC 单指标难以对特定条件下生态环境质量改善作出准确判断, LAI 指标加入有助于提高评估结论的可靠性。基于逻辑斯蒂种群增长模型, 提出了 FVC、LAI 生态质量变化多指数表达框架, 未来应在制定更为细致的特征指数选取方案和植被功能性状特征区划的基础上, 分区厘定种群增长特征、功能指数响应特征, 提高生态质量变化多指数表达能力。

关键词: 保护成效评估; 生态保护红线; 植被功能特征区划; 期望得分

Research on the evaluation method of ecological protection and restoration effectiveness in Sichuan Province based on expected growth

YANG Miao^{1,*}, HOU Peng², ZHAI Jun², CAI Mingyong², LIN Naifeng³, WU Xia¹

1 Sichuan Research Academy of Environmental Sciences, Chengdu 610041, China

2 Satellite Environment Center of the Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100094, China

3 Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Nanjing 210042, China

Abstract: The evaluation of the effectiveness of ecological protection and restoration is not only necessary for the performance evaluation of ecological civilization construction in the new era, but also a challenge and cutting-edge issue facing the international ecological field. In order to scientifically evaluate the effectiveness of ecological protection and restoration, overcome the shortcomings of existing functional indicators and indicator threshold settings, this article analyzes the trend of FVC and LAI changes and spatial clustering characteristics in Sichuan Province in the past 10 years. Based on

基金项目: 国家重点研发计划 (2022YFF1300204); 四川省重点研发项目 (2022YFS0470); 四川省重点研发项目 (2023YFS0378); 四川省科技计划项目 (2023JDR0065)

收稿日期: 2024-03-07; 网络出版日期: 2024-10-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: miaoy02@163.com

spatial and temporal dimensions, five characteristic zones of vegetation functional traits are established, and an expected score standard value table is developed. A protection effectiveness evaluation based on expected growth is carried out. The results show that: (1) In the past 10 years, FVC and LAI in Sichuan Province have shown an overall growth trend, and the spatial differentiation of growth patterns is in line with the overall binary climate framework of the western Sichuan Plateau climate zone and the eastern central subtropical climate zone in Sichuan Province, and also corresponds to the distribution of zonal vegetation in Sichuan Province. The areas with extremely low growth values of FVC and LAI ($P < 0.01$) are mainly located in the mountainous areas of the northwest Sichuan Plateau, within the borders of Aba Prefecture and Ganzi Prefecture. In the subtropical climate zone of eastern Sichuan, the FVC and LAI of the evergreen broad-leaved forest in the basin edge mountainous areas and the evergreen broad-leaved forest in southwestern Sichuan are in high growth areas. The different growth performances of the two in agricultural vegetation areas such as the Sichuan Basin and southwestern mountainous areas reflect the comprehensive effects of climate, zonal vegetation, and human activities, as well as the differential responses of FVC and LAI to the above comprehensive effects. (2) From 2021 to 2022, LAI-Kq in Sichuan Province remained basically stable, while FVC-Kq remained generally stable ($P > 0.05$), with significant declines in various cities ($P < 0.05$). The ecological protection effectiveness level in Sichuan Province was basically stable. (3) For areas with different protection intensities, from 2021 to 2022, the FVC-Kq within the ecological protection red line is lower than that outside the ecological protection red line, and the FVC-Kq within the ecological protection red line belongs to the protected area is lower than that outside the protected area. The impact of different protection intensities within and outside the ecological protection red line on LAI-Kq is relatively small. (4) The FVC single indicator is difficult to make accurate judgments on the improvement of ecological environment quality under specific conditions, and the addition of LAI indicator helps to improve the reliability of evaluation conclusions. Based on the logistic population growth model, a multi index expression framework for FVC and LAI ecological quality changes has been preliminarily proposed. In the future, more detailed feature index selection schemes and vegetation functional trait zoning should be developed, and population growth characteristics and functional index response characteristics should be partitioned to improve the multi index expression ability of ecological quality changes.

Key Words: protection effectiveness assessment; ecological protection red line; vegetation functional feature zoning; expected score

生态保护修复是人类社会促进自然生态系统恢复和支撑可持续发展的重要途径^[1],生态保护修复成效评估是新时期生态文明建设绩效考核的需要,也是国际生态学领域面临的挑战和前沿课题^[2-3]。

关于生态保护成效评估已开展了众多研究^[2, 4-6],尽管目前尚未形成完整的理论体系^[3],评价指标也存在极大不同^[3],但总体来说有两个主要工作思路^[1]:一是直接比较保护修复措施实施前后^[6-8]或不同区域之间^[9-11]监测指标的差异;二是分析指标值与标准阈值关系^[4, 12]。第一种思路适合项目尺度的评估,第二种思路则常被一些技术规范^[13]、标准所采用^[14],用于区域尺度评估。因地理间隔、生态系统演化等自然因素影响,区域内的生态系统结构及多功能性往往存在极大差异,并体现在监测指标上。因此,合理选定基准值或背景值是提高评估精度,科学判断保护成效的关键和基础^[1, 5]。

空间维度上,有学者认为可根据地理分区或生态分区范围作为评估基准差异化选择的依据^[1]。从基准阈值设定来看,以自然地理分区或生态分区范围内未受人类活动影响的保存较完好的植被功能指数做阈值^[1]多有不妥。生态恢复的目标不是未受人类活动影响的气候顶级群落,而是自然历史背景下形成的人-地复合生态系统,如有正常放牧行为的草地、存在耕作活动的农业区域。评估基准设定如能体现人-地复合生态系统特征可望进一步提高评估的精度。有研究表明,生态系统功能多样性指标在同一地理分区或生态分区内具有更为细化的空间聚集性特征^[15],这种特征反应了特定自然地理、社会经济综合影响下的植被指数特点,

可据此分区设立空间阈值基准。时间维度上,气候因素对植被的影响难以忽略^[16–17],在四川人迹稀少区甚至会大于人类活动影响^[18]。以往研究多使用趋势分析、残差分析度量气候影响^[17],如忽略气候变量的时滞和累积效应会导致植被变化归因欠科学^[19]。假设在一段时期内气候因素和一般性人类活动对生态系统功能性状的影响是稳定的,那么以该时期内植被功能指数的多年平均变化率^[20]作为阈值基准,以评估期内植被功能指数变化率与阈值对比,可达到忽略气候因素和一般性人类活动影响而精确识别评估期异常人类活动影响的目的。因此,在时空双基准阈值设立基础上开展生态系统保护成效评估,可简化方法、提高结果的科学性。有别于对数值变化^[3]的简单比较,近年在对归一化植被指数(NDVI)、植被覆盖度(FVC)等植被指数长时间序列的研究中开始重视变化的显著性检验^[4,12,21],剔除统计上不显著的变化,可进一步提高评估结论的可靠性。

划定并严守生态保护红线是党中央深化生态文明体制改革的重点任务^[22],生态环境部印发了《生态保护红线生态环境监督办法(试行)》,提出定期评估生态保护红线保护成效并纳入生态环境领域相关考核^[23]。基于生态保护红线监管需求和管控目标,保护成效评估指标体系从生态保护红线的生态空间保护面积、用地性质、生态功能及管理能力等 4 个方面构建基本得到认可^[24–25]。生态空间保护面积、用地性质、生态功能等是生态系统保护成效最客观的表现,而其中生态功能指标的评估极具挑战,指标选择上研究者或利用 NDVI、FVC 等单一指标,或利用生态系统服务、生态系统生产总值(GEP)^[6,22],及多尺度成效评估^[22]等综合性指标。叶面积指数(LAI)是表征植被数量和结构特征的最基本参量^[26],已在植被质量监测中得到广泛应用^[26],FVC 是《生态保护红线监管指标体系(试行)》(环办生态[2020]29 号)中年度功能监测指标。本研究选择 FVC 和 LAI 两个功能性状指标,在时空两维度多基准设立基础上开展评估方法、指标适用性研究,以期生态保护红线成效评估为主体的生态保护修复成效评估提供技术支撑,助力管理考核和生态保护修复政策制定^[5]。

1 材料与方法

2000—2022 逐年 FVC、LAI 来源于生态环境部卫星环境应用中心,分辨率分别为 500m、250m,数据类型为年均值,存储格式为 TIF。计算 2010—2020 十年来四川省 FVC 平均变化率(FVC-K)^[9,20]。在 ArcGIS 中创建面积为 10km²的六边形渔网,统计渔网内 FVC-K 的均值 FVC-K-mean,根据 Getis-Ord G_i^* 方法^[27–28]分析其在四川省域范围内的空间聚集性,并把极显著高值区($P<0.01$)、显著高值区($P<0.05$)、稳定增长区($P>0.05$)、显著低值区($P<0.05$)、极显著低值区($P<0.01$)分别标记为 A、B、C、D、E 共 5 个功能增长特征区(功能特征区)。分别统计 5 区 FVC-K-Mean 的平均值 μ 和标准差 σ ,根据表 1 分别制定 5 区多基准 FVC 保护成效期望得分标准表。计算 2021—2022 年 FVC 变化率,查找保护成效期望得分(Kq)标准表确定 FVC 年度(2021—2022 年)期望得分 FVC-Kq,并以此表示保护成效。LAI 年度(2021—2022 年)期望得分 LAI-Kq 计算相同。研究通过对比行政区全域及辖区内生态保护红线区保护成效得分,以及对比自然保护地内外的生态保护红线保护成效得分,来分析评估结论的可靠性。

表 1 保护成效期望得分标准值表

Table 1 Conservation effectiveness expectation score criteria table

增长特征 Growth characteristics	极显著降低 Dramatically reduced	显著降低 Significantly reduced	轻微降低 Slightly lowered	维持稳定 Maintain stability	轻微增加 Slight increase	显著增加 Significant increase	极显著增加 Dramatically increase
分类依据 Classification by	$<\mu-2.58\sigma$	$[\mu-2.58\sigma, \mu-1.96\sigma)$	$[\mu-1.96\sigma, \mu-1.65\sigma)$	$[\mu-1.65\sigma, \mu+1.65\sigma)$	$[\mu+1.65\sigma, \mu+1.96\sigma)$	$[\mu+1.96\sigma, \mu+2.58\sigma)$	$>\mu+2.58\sigma$
期望得分 Expected score	0	20	40	60	80	100	120

μ : 功能特征区内植被指数多年平均增长率均值; σ : 功能特征区内植被指数多年平均增长率的标准差

2 结果与分析

2.1 四川省植被功能性状特征区划

近 10 年来,四川省 FVC、LAI 总体呈增长趋势,增长极高值区 ($P<0.01$) 和极低值区 ($P<0.01$) 分化明显,且占据了绝大部分国土空间。植被两个功能性状空间分布格局极其相似,极高值区 ($P<0.01$) 基本位于四川盆周山地、盆地丘陵区,以及川西南山地区东北部。极低值区 ($P<0.01$) 基本位于川西北高原山地,阿坝州和甘孜州境内。在成都平原城市群、川西北高山峡谷分别存有一定范围的异常低值区 ($P<0.01$) 和异常高值区 ($P<0.01$) (图 1)。

对于 FVC 和 LAI 两个功能性状,高增长也意味着高的波动性。从功能特征区 E 区至 A 区,变化率均值增加的同时标准差也在增加(表 2)。

表 2 植被功能性状分区统计表
Table 2 Zoning statistics of vegetation functional traits

功能性状指标 Functional trait indicators	统计值 Statistical value	A 区 Zone A	B 区 Zone A	C 区 Zone A	D 区 Zone A	E 区 Zone A
叶面积指数平均变化率(LAI-k)	平均值	0.076	0.041	0.033	0.003	0.004
Growth rate of LAI	标准差	0.251	0.207	0.209	0.188	0.156
植被覆盖度平均变化率(FVC-k)	标准差	1.224	0.849	0.633	0.420	0.172
Growth rate of FVC	平均值	0.530	0.530	0.494	0.390	0.387

A—E 区本别指 A、B、C、D、E5 个功能增长特征区(功能特征区)。

2.2 植被指数年度变化

2021—2022 年,四川省 LAI 平均变化率 0.03,呈正增长的占国土面积的 53%,负增长占 47%,但在预期值范围内的占国土面积的 99.56% ($P>0.05$),显著高于预期值的占国土面积的 0.27% ($P<0.05$) 主要位于川东北秦巴山区以及阿坝州部分区域,显著低于预期值的仅占国土面积的 0.17% ($P<0.05$),主要位于攀西地区、甘孜州范围内。从所占面积比例来说,2021—2022 年四川省 LAI 维持稳定(图 1)。

2021—2022 年,四川省 FVC 平均变化率-1.44,呈正增长的占国土面积的 38.37%,负增长占 61.33%。在预期值范围内的占国土面积的 22.25% ($P>0.05$),显著高于预期值的占国土面积的 14.17% ($P<0.05$),主要位于阿坝州松潘县境内岷江源区域、川北涪江流域、川东北嘉陵江、渠江流域,以及甘孜境内大雪山区和攀西地区。显著低于预期值的占国土面积的 63.58% ($P<0.05$) 且在四川省内广泛分布。从所占面积比例来说,2021—2022 年四川省 FVC 增长效果不佳(图 1)。

2.3 保护成效

2.3.1 行政区全域保护成效期望得分

2021—2022 年,全省 LAI-Kq 平均 60.33 分,各市州、区县 LAI-Kq 也均 60 分左右,为维持稳定状态且呈均质化特征 ($P>0.1$);全省 FVC-Kq 平均 30.69 分,多数市州、区县 FVC-Kq 在 20—60 分之间,虽未达预期增长水平差异并不显著 ($P>0.05$)。市州、区县之间异质性较大,广安、资阳、内江、乐山、宜宾和泸州等 6 市下降明显 ($P<0.05$)。县级层面 FVC-Kq 下降明显的主要位于甘孜州北部、阿坝州西南部,以及川东北、川南和四川盆地西缘 ($P<0.05$) (图 2)。

2.3.2 生态保护红线保护成效期望得分

2021—2022 年,全省红线 LAI-Kq 平均 60.37 分,各市州、区县生态保护红线 LAI-Kq 也均 60 分左右,为维持稳定状态;全省红线 FVC-Kq 平均 28.91 分,多数市州、区县 FVC-Kq 处于 20—60 分之间,虽未达预期增长水平但差异并不显著 ($P>0.05$)。市州、区县之间异质性较大,显著下降 ($P<0.05$) 的 3 个市分别是成都、眉山、广安,县级层面显著下降的主要位于甘孜州北部和阿坝州西南部,以及盆周山地包括盆地西缘岷山-龙门山-邛崃山一线区县 ($P<0.05$)。显著上升的主要位于遂宁市为主的川东丘陵区 ($P<0.05$) (图 2)。

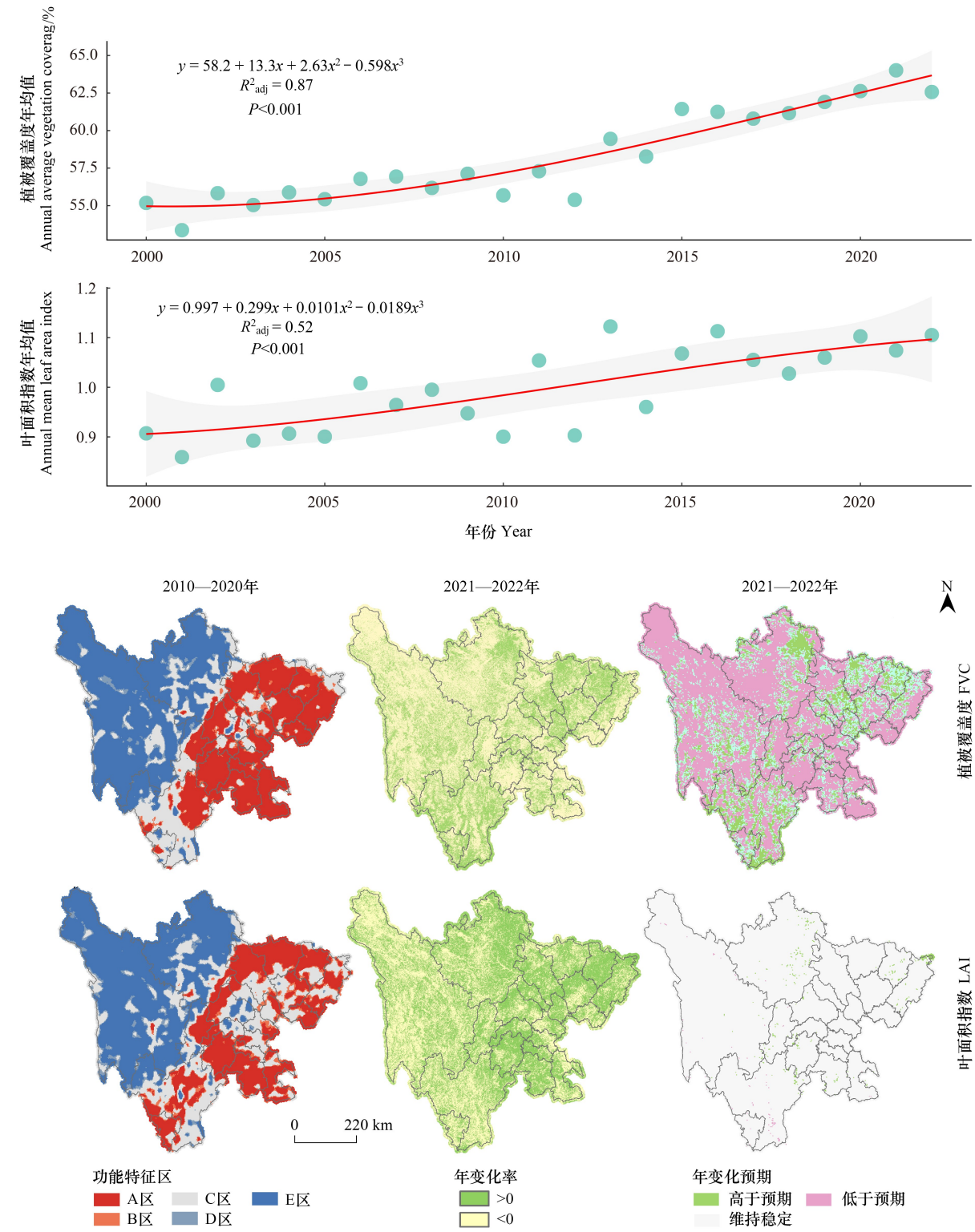


图1 植被功能指数增长趋势及植被功能特征区划

Fig.1 The growth trend of vegetation function index and the zoning of vegetation function characteristics
FVC: 植被覆盖度; LAI: 叶面积指数, 增长趋势图中灰色阴影代表植被指数年均值的置信区间

2.3.3 不同保护强度保护成效期望得分差异

(1) 生态保护红线与全域保护成效差异

按省行政单元进行统计, 2021—2022 年四川省生态保护红线内 LAI-Kq 平均分 (60.37) 稍高于全省

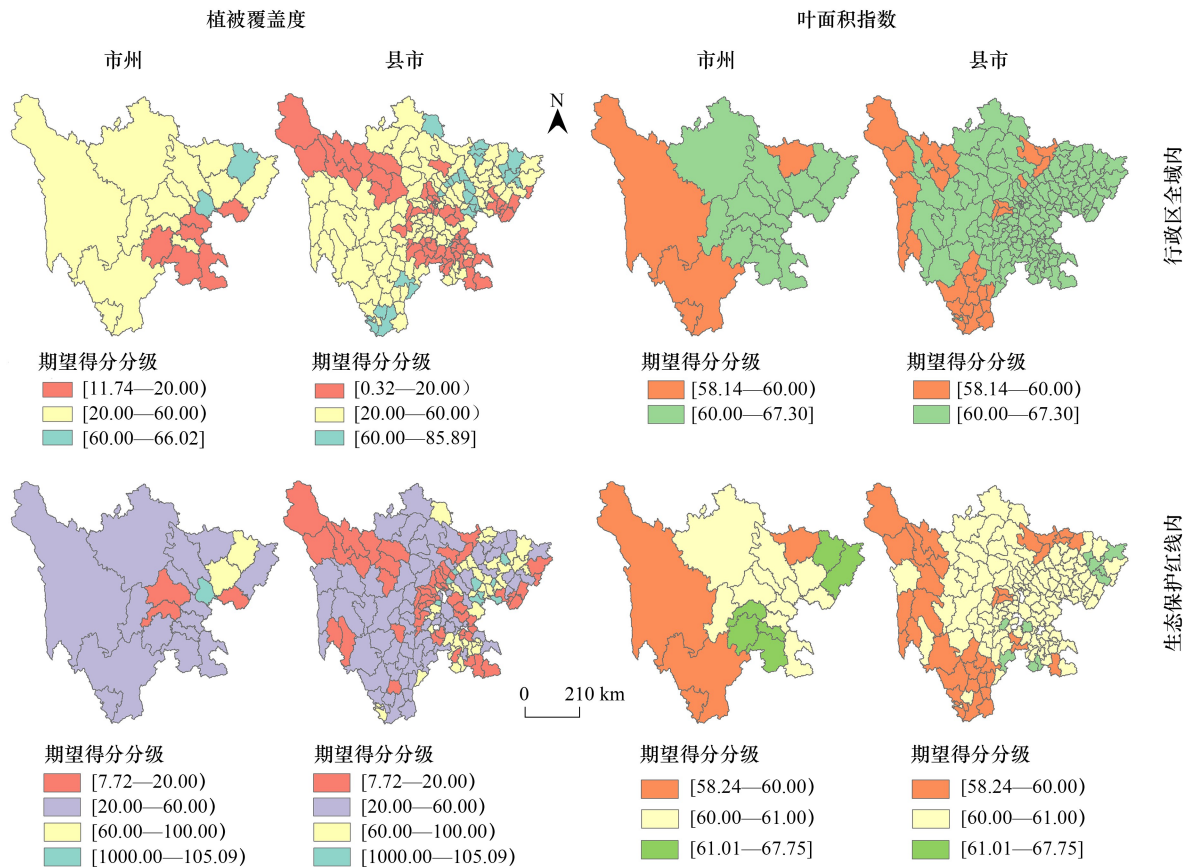


图2 市、县行政单元全域及生态保护红线内保护成效得分

Fig.2 Scores of protection effectiveness in the whole area of administrative units and within the ecological protection red line

(60.33), 生态保护红线内 FVC-K_q 平均分 (28.91) 则略低于全省 (30.69)。按市、县行政单元进行统计, 两级行政单元 2021—2022 年生态保护红线内 FVC-K_q、LAI-K_q 均值略高于全域。一般认为, 生态保护红线内 FVC、LAI 的增长率要高于全域平均水平, 根据对市、县统计单元内红线区与全域 K_q 比值的分析, 位于高山区域 (甘孜州、攀西地区)、盆周山地的大部分区县其红线内的 FVC-K_q、LAI-K_q 普遍低于全域水平, 这可能是按省级层面生态保护红线内 FVC-K_q 平均分低于全省平均值的原因 (图 3)。

(2) 生态保护红线在自然保护地内、外保护成效差异

无论保护地内、外, FVC-K_q、LAI-K_q 与预期差异均不显著 ($P>0.05$), FVC-K_q、LAI-K_q 各自在保护地内、外的相对高低规律与省、市、县统计单元的尺度选择无关。按省行政单元进行统计, 2021—2022 年四川省生态保护红线属于保护地范围的区域 FVC-K_q 平均分 (27.00), 低于保护地外 FVC-K_q 平均分 (31.12); LAI-K_q 平均分则保护地内区域 (60.77) 高于保护地外 (59.90)。对于多数市、县来说, 保护地内/外的 FVC-K_q、LAI-K_q 比值具有相反态势, FVC-K_q 比值保护地内普遍低于保护地外, 而 LAI-K_q 比值保护地内则略微高于保护地外 (图 4)。

3 讨论与结论

3.1 四川省生态保护成效基本稳定且处于改善预期

2021—2022 年, 四川省 LAI 平均变化率 0.03, 呈负增长的占国土面积的 47%; 四川省 FVC 平均变化率 -1.44, 呈负增长的占国土面积的 61.33%。如分别以 2021—2022 年 LAI、FVC 变化率为指标进行保护成效评估则会得出完全的反向结论。从 FVC、LAI 正负增长所占面积比例来说, 2021—2022 年四川省生态保护成效

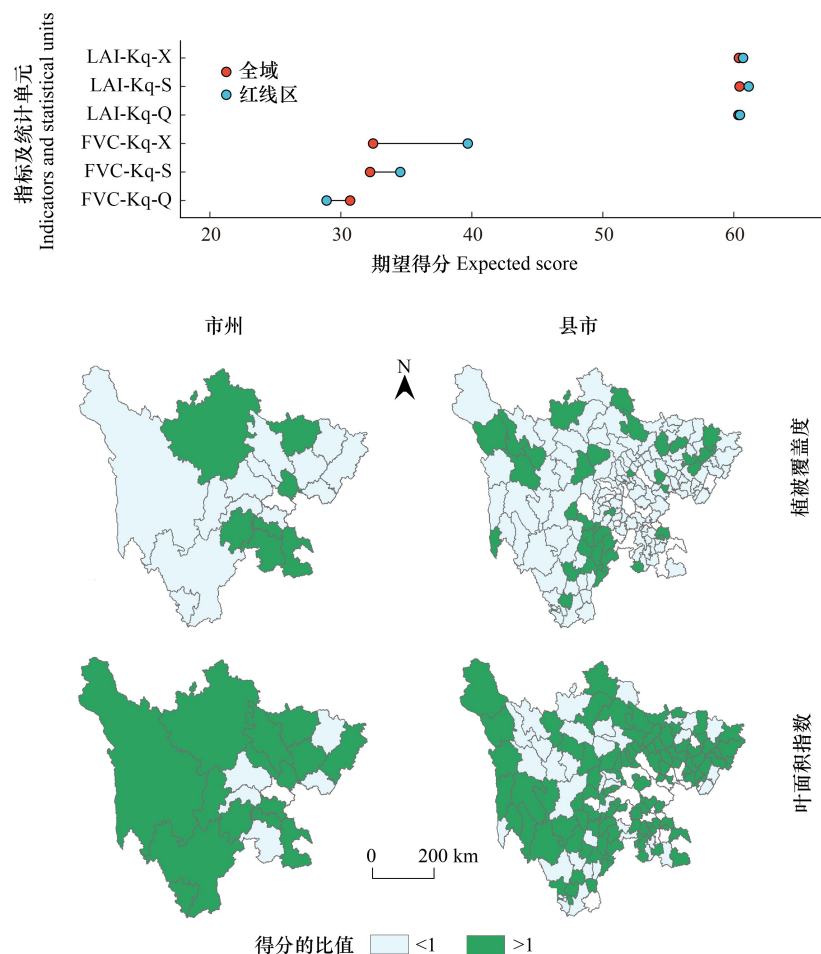


图3 生态保护红线区与全域保护成效差异

Fig.3 The difference between the ecological protection redline and the global protection effect

-X:县;-S:市;-Q:省,LAI-Kq: 叶面积指数期望得分;FVC-Kq: 植被覆盖度期望得分

均不佳。本文从空间、时间两个维度确立了植被功能性状 5 个特征区,结合具有不同显著水平的期望得分标准值表,确立了二维多增长基准。2021—2022 年,四川省 LAI-Kq 基本维持稳定;全省及多数市州、区县的 FVC-Kq 在 20—60 分之间,虽未达预期但差异并不显著 ($P>0.05$),FVC-Kq 总体稳定 ($P>0.05$),仅各别市下降明显 ($P<0.05$)。基于 LAI、FVC 的评估结果虽有差异,但总体可得出四川省生态保护成效为基本稳定的结论。曲线二阶导数表示函数曲线的凹凸情况,正值表示凸性,负值表示凹性,一阶导数表示曲线变化率。10 年来四川省 FVC、LAI 年均值拟合曲线二阶、一阶导数皆为正,说明整体上 FVC、LAI 具有增长减速趋势,但生态环境质量仍具有改善预期。

3.2 不同植被功能指数需设立独立基准

研究表明,10 年来,四川省植被功能指数 FVC、LAI 总体呈增长趋势,与已有研究一致^[29]。FVC、LAI 增长极低值区 ($P<0.01$) 基本位于川西北高原山地,阿坝州和甘孜州境内。在四川东部中亚热带气候区内,盆缘山地常绿阔叶林和川西南山地常绿阔叶林^[30]的 FVC、LAI 处于变化率高值区;近 10 年的增长模式呈现出川西高原增长极低值区和四川盆地、川西南山地增长极高值区两个特征部分,契合四川省川西高原气候区和东部中亚热带气候区大体二分气候框架^[31],也与四川省地带性植被分布相对应^[32],即川西高原两个植被地带(Ⅱ.川西高山山原峡谷针叶林地带、Ⅲ.川西北高原灌丛、草甸地带)和四川东部的“Ⅰ.川东盆地及西南山地常绿阔叶林地带”。说明气候对植被地带性分布具有关键决定作用,也说明地带性植被具有差异化的功能性

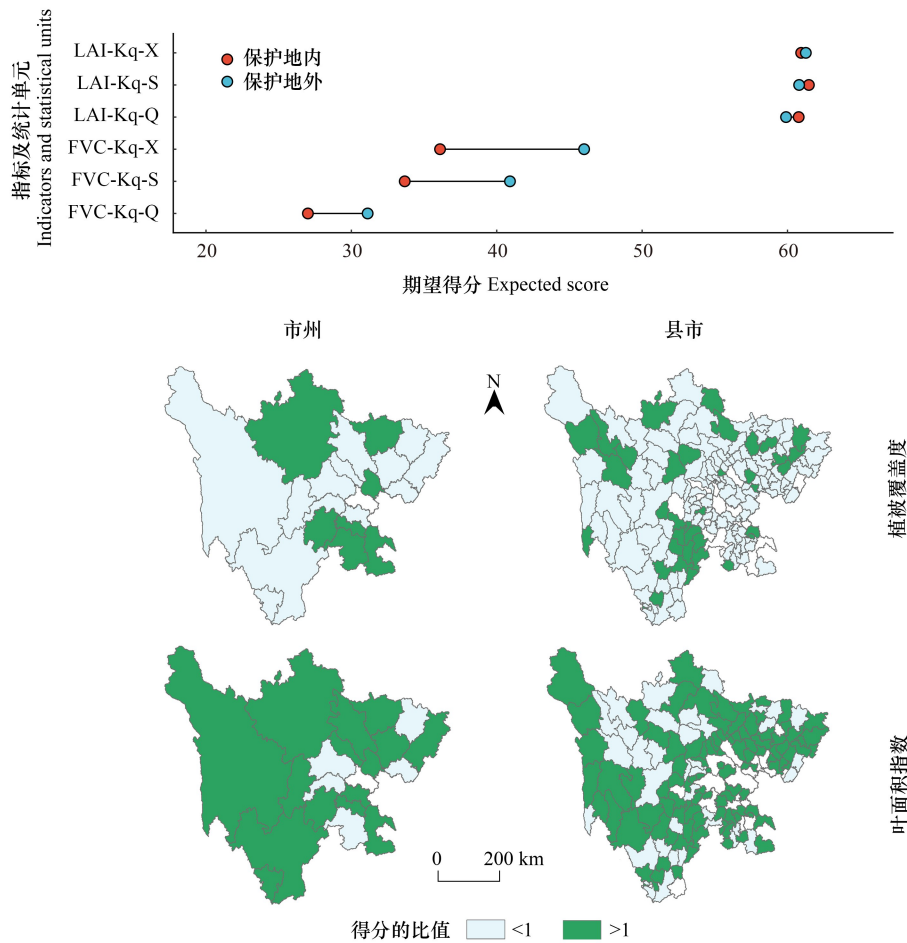


图4 生态保护红线在保护地内/外保护成效差异

Fig.4 Differences in the effectiveness of ecological protection redlines in and outside protected areas

状增长特征。受人类活动影响,成都城市群局部 FVC,尤其是 LAI 处于增长的极低值区($P < 0.01$)。植被功能性状变化率的空间分异体现了气候、地带性植被,以及人类活动等因素综合作用的结果,但不同植被功能性状增长对上述作用的响应并不完全一致,在四川盆地农业植被区^[32] FVC 变化率处于极高值区($P < 0.01$),而 LAI 则不处于极值区($P > 0.05$),两者在西南山地区域的变化率差异也较为明显。因此,相较基于自然地理分区或生态分区的阈值设定,二维多基准的设立可更为客观的刻画植被内因驱动,气候变化和人类活动外因影响条件下,人-地复合生态系统在次生平衡态下植被的增长特征。从而提高识别人类活动对植被的非常规影响的统计确定性。需注意的是,应对不同植被指数设立独立的基准。

3.3 植被功能指数变化的生态解读

2021—2022 年四川省 61.33% 国土面积的 FVC 呈负增长,63.58% 国土面积显著低于预期增长值($P < 0.05$),但多数市州、区县 FVC-Kq 在 20—60 分之间,虽未达预期增长水平差异并不显著($P > 0.05$),可认为相关行政区指标处于正常波动状态。对于 FVC、LAI,以及 FVC-Kq、LAI-Kq 下降明显($P < 0.05$)的市州、区县,是否意味着生态环境质量的下降?有研究发现黄河流域生态环境良好的部分区域 FVC 降低^[26]。对若尔盖湿地区域来说,生态恢复湿地涵养能力增强、湖泊水面增加会导致 FVC 降低。长期受到良好保护的天然保护地内 FVC-Kq 低于保护地外红线区域,暗示着稳定种群具有低 FVC 增长特征。四川省有 73.4% 的生态保护红线位于川西北高原山地的阿坝州、甘孜州,属于 FVC、LAI 增长极低值区($P < 0.01$),此区域红线内有大面积的高山流石滩脆弱生态系统,受自身低增长影响,四川省生态保护红线内 FVC-Kq 低于生态保护红线外,因此也低

于全省平均水平。故 FVC 单指标不足以对特定条件下生态环境质量改善作出准确判断, LAI 指标加入提供了额外的植被功能性状信息有助于提高评估结论的可靠性, 但系统理解 FVC、LAI 指标复合变化及其生态指示意义, 需要建立一种全新的理论框架。基于种群的逻辑斯蒂增长模型提出以下假设, 当 $N < K$, 植被处于种群密度增长期(开始期、加速期、减速期), 植被群落以横向扩展为主, 体现为 FVC 增长并逐渐转为 LAI 增长, 当 $N = K$, 植被种群数量不变(饱和期), 以 LAI 变化率波动变化为主。当 $N > K$, 种群数量下降, 逐步由 LAI 降低, 伴有 FVC 降低。2021—2022 年四川省 FVC 期望得分大幅度降低, LAI 基本稳定, 根据假设, 四川省生态系统应总体处于增长减速期。对四川省生态系统保护成效评估结果的解读, 应在生态系统总体处于增长减速期背景下, 结合人类活动影响特点和地带性植被特征进行分析。西南山地金沙江流域低 FVC-Kq、高 LAI-Kq, 可能与群落近于饱和期有关。

3.4 不足与展望

3.4.1 生态质量变化多指数表达能力需进一步提高

目前基于多光谱卫星遥感影像提出的植被指数有 100 多种。不同植被指数在解决具体问题时各有优缺点, 如 NDVI 在高植被覆盖度区易达到饱和, 而 NGRDI 仅适用于刻画高植被覆盖度区^[33]。NDVI 与 FVC 在植被密度低的区域应用效果都不尽理想, 在荒漠植被分布稀疏, 土壤调整型植被指数(SAVI、MSAVI)却能够更好地反演植被覆盖变化状况^[34]。本研究直接采用了常用的 FVC 和 LAI 指数, 未来在指数选取、精度提升^[35]、生态解读等方面仍有许多工作要做。基于逻辑斯蒂种群增长模型的假设, 本文初步提出了 FVC、LAI 生态质量变化多指数表达框架, 但仍是初步设想, 未来应加强植被功能指数研究的 Meta 分析, 在制定更为细致的特征指数选取方案和植被功能性状特征区划的基础上, 分区厘定种群增长特征、功能指数响应特征, 提高生态质量变化多指数表达能力。

3.4.2 影响因素对植被指数作用方式需系统性研究

本研究把一般性气候变化、人类活动带来的方差内部化, 评估时无需考虑其常规性影响。管理者为制定生态保护修复措施, 减缓气候、人为活动的不良影响, 需要明晰外部影响来源及对植被指数作用方式。研究表明气温和降水等气候因子, 尤其是气温对 FVC 增长有着显著的影响^[19, 29], 一般来说气温升高、降水增加有利于植被生长^[26, 29, 36], 反之则不利于植被生长, 也有研究发现气温与降水在 FVC 高值区对 FVC 具有显著抑制作用^[37]。显然后续应就结论适用边界进行系统性研究。政策制定者和措施实施者关注的焦点在于生态保护修复措施对生态环境质量有何影响, 以及如何监测评估影响大小。对于工程型人类活动可导致 FVC、LAI 增长的异常改变^[38]目前已经开展了大量研究, 而关于生态保护红线划定等保护型政策的生态效应研究仍嫌不足。

3.4.3 提高精度降低信息干扰

植被功能指数以栅格数据形式存储, 生态保护红线、行政界限等边界数据以矢量格式存储, 导致边界不能完全重合, 研究区内外数据因分辨率问题而产生均一化, 降低了内外差异的辨识精度。在生态保护红线面积特别小, 边界较为复杂的区域均一化问题尤为严重。四川省川西地区生态保护红线单一斑块面积较大, 行政单元国土面积也较大, 四川盆地区域生态保护红线总体面积较小, 行政单元面积较小斑块破碎。进行红线内外保护成效分析时, 四川盆地区域受影像分辨率影响程度更大。未来可通过选择更高精度遥感影像生产的植被功能指数, 优化数据统计方法改善研究对象间数据均一化现象。

参考文献(References):

- [1] 侯鹏, 高吉喜, 万华伟, 施佩荣, 王永财, 孙晨曦. 陆地生态系统保护修复成效评估研究进展及主要科学问题. 环境生态学, 2021, 3(4): 1-7.
- [2] 江波, 王晓媛, 杨梦斐, 蔡金洲. 生态系统服务研究在生态红线政策保护成效评估中的应用. 生态学报, 2019, 39(9): 3365-3371.
- [3] 邵全琴, 樊江文, 刘纪远, 黄麟, 曹巍, 徐新良, 葛劲松, 吴丹, 李志强. 三江源生态保护和建设一期工程生态成效评估. 地理学报, 2016, 71(1): 3-20.

- [4] 付梦娣,刘伟玮,李博炎,任月恒,李爽,白雪,李俊生,朱彦鹏. 国家公园生态环境保护成效评估指标体系构建与应用. 生态学报, 2021, 40(12): 4109-4118.
- [5] 陈子琦,侯光雷,张艳红,董凯凯,刘兆礼. 面向生态系统结构的生物多样性保护成效空间对比评估. 生态学报, 2023, 43(7): 2793-2799.
- [6] 吴之见,杜思敏,黄云,郑博福,谢泽阳,罗诚康,万飞,朱锦奇. 基于生态系统生产总值核算的生态保护成效评估——以赣南地区为例. 生态学报, 2022, 42(16): 6670-6683.
- [7] 侯鹏,王桥,杨旻,李静,翟俊,蔡明勇. 生态保护红线成效评估框架与指标方法. 地理研究, 2018, 37(10): 1927-1937.
- [8] 白穆,王馨爽,孟小亮,耿伟,孙鑫. 陕西黄河湿地省级自然保护区保护成效遥感监测与分析. 测绘地理信息, 2023, 48(5): 85-91.
- [9] 董庆栋,陈超男,李艳红,赵体侠,孙梓欣,张哲,朱连奇. 基于 NPP 和人类扰动指数评估河南伏牛山地区国家级自然保护区群保护成效与溢出/泄漏效应. 生物多样性, 2023, 31(5): 98-109.
- [10] 冷仙,曾源,周键,杨飞岭,武瑞东. 基于熵权 TOPSIS 法的西南自然保护区景观保护成效评价. 生态学报, 2023, 43(3): 1040-1053.
- [11] 肖璐瑶,张勘,朱玉东,束潇潇,郑普阳,王远飞,梁福轩,谢锋. 大凉山区保护空缺分析与四川栗子坪国家级自然保护区保护成效评估. 生态学报, 2023, 43(11): 4502-4514.
- [12] 董贵华,王业耀,于洋,刘海江,王刚,罗海江. “十三五”以来我国生态质量状况时空变化分析. 中国环境监测, 2023, 39(1): 1-9.
- [13] 生态环境状况评价技术规范//环境保护部. 中国环境科学出版社. 2015.
- [14] 中国科学院生态环境研究中心,生态环境部卫星环境应用中心,中国标准化研究院. 生态系统评估生态系统格局与质量评价方法. 国家市场监督管理总局;国家标准化管理委员会. 2023.
- [15] 杨渺,肖焱,欧阳志云,江腊海,侯鹏. 四川省生物多样性与生态系统多功能性分析. 生态学报, 2021, 41(24): 9738-9748.
- [16] 杨欣,薛华柱,董国涛,刘东皓,李自闯. 1982—2022 年祁连山植被变化及其驱动因子. 生态学报, 2024, 43(6): 1576-1586.
- [17] 郭荣朋,丘伟国,贾丁一,林森,巫志龙,胡喜生. 2000—2020 年福建省植被恢复对气候变化的响应. 森林与环境学报, 2024, 44(1): 1-12.
- [18] 马炳鑫,和彩霞,靖娟利,王永锋,刘兵,何宏昌. 1982—2019 年中国西南地区植被变化归因研究. 地理学报, 2023, 78(3): 714-728.
- [19] 马云飞,何全军,张月维,石艳军,李建平,袁福香. 气候因子和人类活动对松辽流域植被叶面积指数动态的影响. 生态学报, 2024, 44(5): 2043-2056.
- [20] 燕丹妮,武心悦,王博恒,郝红科. 1982—2015 年黄土高原植被变化特征及归因分析. 生态学报, 2023, 43(23): 9794-9804.
- [21] 曹书舸,陈爽. 江苏重要生态功能区质量演变及红线管控效应分析. 生态学报, 2023, 43(21): 8933-8947.
- [22] 肖武,阮琳琳,岳文泽,周妍,张丽佳,胡月明. 面向国土空间生态保护修复的多尺度成效评估体系构建. 应用生态学报, 2023, 34(9): 2566-2574.
- [23] 徐德琳,邹长新,林乃峰,王燕. 基于成效评估的生态保护红线监管目标实现途径. 环境保护, 2023, 51(Z1): 29-32.
- [24] 徐德琳,邹长新,林乃峰,王燕,徐梦佳,吴丹,曹秉帅. 生态保护红线保护成效评估指标体系构建. 生态与农村环境学报, 2020, 36(12): 1562-1568.
- [25] 杨旻,侯鹏,祝汉收,金点点,曹巍,陈妍,翟俊. 生态安全视角下的生态保护红线成效评估研究. 测绘科学, 2022, 47(8): 135-145.
- [26] 李晴晴,曹艳萍,苗书玲. 黄河流域植被时空变化及其对气候要素的响应. 生态学报, 2022, 42(10): 4041-4054.
- [27] Getis A, Ord J K. The analysis of spatial association by use of distance statistics. Geographical Analysis, 1992, 24(3): 189-206.
- [28] Ord J K, Getis A. Local spatial autocorrelation statistics: distributional issues and an application. Geographical Analysis, 1995, 27(4): 286-306.
- [29] 刘雨亭,王磊,李谢辉,郭蕾. 西南地区 2000—2020 年植被覆盖度时空变化与影响因素分析. 高原气象, 43(1): 264-276.
- [30] 四川植被协作组. 四川植被. 成都:四川人民出版社, 1980.
- [31] 杨渺,江腊海,谢强,吴瑕,艾蕾. 四川省维管植物和脊椎动物空间分布格局研究. 环境科学研究, 2022, 35(10): 2357-2366.
- [32] 钟章成,秦万成,徐茂其. 四川植被地理历史演变的探讨. 西南师范学院学报(自然科学版), 1979, 23(1): 1-13.
- [33] 刘琳,郑兴明,姜涛,李雷,丁艳玲. 无人机遥感植被覆盖度提取方法研究综述. 东北师大学报: 自然科学版, 2021, 53(4): 151-160.
- [34] 王宁,周明通,魏宣,郭玉川. 沙漠腹地绿洲植被覆盖度提取及植被指数优选. 水土保持通报, 2022, 42(6): 197-205, 213.
- [35] 于嵘. 基于遥感时序数据的中国陆地植被覆盖变化分析研究[D]. 北京:中国科学院研究生院(遥感应用研究所), 2006.
- [36] 郭玉超,任鸿瑞. 青藏高原干旱荒漠地区叶面积指数时空变化及影响因素. 中国水土保持科学(中英文), 2023, 21(5): 38-50.
- [37] 赵雨琪,魏天兴. 1990—2020 年黄土高原典型县域植被覆盖变化及影响因素. 干旱区研究, 2024, 41(1): 147-156.
- [38] 陈雪萍,赵学勇,张晶,王瑞雄,卢建男. 基于地理探测器的科尔沁沙地植被 NDVI 时空变化特征及其驱动因素. 植物生态学报, 2023, 47(8): 1082-1093.