

DOI: 10.5846/stxb202205091290

武锦辉, 张亮亮, 赵秉琨, 杨楠, 高培超. 基于临界慢化模型和长时间序列叶面积指数的植被及其恢复力遥感监测研究——以三峡库区为例. 生态学报, 2023, 43(12): 5084-5095.

Wu J H, Zhang L L, Zhao B K, Yang N, Gao P C. Remote sensing assessing of vegetation and its resilience based on critical slowing down model and GLASS LAI: A case study in the Three Gorges Reservoir Area. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(12): 5084-5095.

基于临界慢化模型和长时间序列叶面积指数的植被及其恢复力遥感监测研究 ——以三峡库区为例

武锦辉^{1,2,3}, 张亮亮^{2,3,4}, 赵秉琨⁵, 杨楠^{2,3}, 高培超^{6,*}

1 三峡库区地质环境监测与灾害预警重庆市重点实验室, 重庆 404100

2 中国地质环境监测院, 中国地质调查局, 北京 100081

3 矿山生态效应与系统修复自然资源部重点实验室, 北京 100081

4 长江大学地球科学学院, 武汉 430100

5 南京林业大学土木工程学院, 南京 210037

6 北京师范大学地理科学学部, 北京 100871

摘要: 基于临界慢化模型, 利用长时间序列叶面积指数 (GLASS LAI) 数据, 进行时间序列分解后, 计算了 LAI 及其时间自相关指数作为指标, 对三峡库区植被及其恢复力进行监测, 通过案例模型对临界慢化模型精度进行了验证, 分析了三峡库区植被及其植被恢复力的时空分布特征, 探索基于临界慢化模型的植被恢复力遥感定量估算方法的适用性。结果表明: (1) 2000—2018 年三峡库区 LAI 平均值为 3.4, 重庆段 LAI 较低, 湖北段 LAI 较高; 三峡库区 LAI 整体呈上升趋势, 重庆段 LAI 呈现降低趋势, 显著下降区域占重庆段面积的 21.75%, 湖北段 LAI 呈现升高趋势, 显著上升区域占湖北段面积的 21.22%; (2) 2000—2018 年三峡库区重庆市北碚区、大渡口区、渝北区植被恢复力较低, 宜昌市兴山县、夷陵区、点军区植被恢复力较高; (3) 模型精度方面, 在两个地质灾害扰动事件中案例模型结果与临界慢化模型结果呈现较高的一致性。本文对三峡库区 2000—2018 年的植被恢复力进行了定量估算, 同时通过案例模型对临界慢化模型在恢复力监测上的有效性进行了验证, 为三峡库区制定相应生态环境管理决策提供理论基础, 为保障西南地区生态安全提供决策依据。

关键词: 植被恢复力; 遥感; 叶面积指数 (LAI); 临界慢化; 三峡库区

Remote sensing assessing of vegetation and its resilience based on critical slowing down model and GLASS LAI: A case study in the Three Gorges Reservoir Area

WU Jinhui^{1,2,3}, ZHANG Liangliang^{2,3,4}, ZHAO Bingkun⁵, YANG Nan^{2,3}, GAO Peichao^{6,*}

1 Chongqing Key Laboratory of Geological Environment Monitoring and Disaster Warning in Three Gorges Reservoir Area, Chongqing 404100, China

2 China Institute of Geo-Environment Monitoring, China Geological Survey, Beijing 100081, China

3 Key Laboratory of Mine Ecological Effects and Systematic Restoration, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China

4 School of Earth Sciences, Yangtze University, Wuhan 430100, China

5 College of Civil Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China

6 Faculty of Geographic Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100871, China

Abstract: Vegetation resilience is the ability of vegetation to recover from disturbances without shifting to an alternative

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42101407, 41901316); 三峡库区地质环境监测与灾害预警重庆市重点实验室开放课题 (ZD2020A0303)

收稿日期: 2022-05-09; **网络出版日期:** 2023-02-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gaopc@bnu.edu.cn

state or losing function and services, which is critical to maintain ecosystem quality and stability. Assessing vegetation resilience has become an urgent requirement to deal with ecosystem degradation under the climate change and influence of anthropogenic. However, large scale vegetation resilience measurement is fraught with difficulty, since the lack of remote sensing production and limitation of measurement model. Here, we used GLASS LAI and critical slowing down model to monitor the pattern of vegetation and vegetation resilience in the Three Gorges Reservoir Area (TGRA). We also analyzed the accuracy of critical slowing down model using case model to discuss the feasibility in remote sensing vegetation resilience monitoring. In general, LAI autocorrelation as an indicator monitored the vegetation resilience of each district in the TGRA. We found that the average LAI was 3.4 and LAI showed an increasing trend during 2000—2018 in the TGRA. LAI of Chongqing section showed a decrease trend while that of Hubei section showed an increase trend. Spatially, the area of significant decline accounted for 21.75% of the Chongqing section and the significantly increased area accounted for 21.22% of the area of Hubei section. For vegetation resilience, Hubei section showed stronger resilience than Chongqing section. Within TGRA, Beibei, Dadukou and Yubei exhibited low vegetation resilience while Xingshan, Yiling and Dianjun exhibited high vegetation resilience. In terms of model accuracy, the results of the case model and the critical slowing down model were with a high consistency in two geohazard disturbances. Overall, when assessing vegetation resilience in a large scale using long-term remote sensing data, the critical slowing down was able to offer reasonable indicators. Furthermore, our results indicated that anthropogenic factors had the negative effects on vegetation resilience. Confirmation with ground data will be needed to validate these results and to better understand the biological processes determining vegetation restoration ability.

Key Words: vegetation resilience; remote sensing; Leaf Area Index (LAI); critical slowing down; Three Gorges Reservoir Area

近几十年来全球气候变化与人类开发活动使得生态环境发生了深刻变化,尽管国际社会在生态环境保护上已取得不小成就,但并未能从根本上扭转生态系统退化的趋势^[1]。植被是联结土壤、大气和水分之间物质、能量交换的关键环节,是全球环境和气候变化的敏感指示器^[2-3]。因此,植被恢复被认为是陆地生态系统恢复的主要途径^[4],对陆表植被变化及其恢复力进行有效监测成为应对生态系统退化的迫切要求。植被恢复力(也称“弹性”、“韧性”)指植被受外界自然扰动后恢复到扰动前状态的能力^[5],是影响生态系统质量和稳定性的关键参数。1973年Holling首次将恢复力这一概念引入生态学领域^[6],随后大量学者围绕生态系统恢复力以及植被恢复力展开研究^[7-9],目前植被恢复力估算模型可分为四类:案例模型、“杯球”模型、阈值模型、临界慢化模型。其中,案例模型无法有效解决扰动的叠加效应^[10-13]、“杯球”模型缺乏定量估算方法^[14-17],阈值模型参数设置主观性较强^[18-20]。临界慢化模型基于植被恢复力降低时,遭受扰动后出现的频繁波动、恢复速率变慢等现象,包含连续性较强的时间维指标和信息量丰富的空间维指标^[21-25],在遥感数据上具有很强的适用性,同时也有效避免了前三种模型的缺陷^[26]。然而由于学科差异,目前基于临界慢化模型的植被恢复力遥感监测大多以NDVI作为数据源,NDVI虽可以反应植被状况,但不具有实际的物理意义,同时在高值区域存在饱和现象。在植被恢复力监测领域,最新的高级遥感产品应用深度不足。

三峡库区地处山地生态系统和水域生态系统的过渡区,是长江流域具有重要战略意义的生态屏障地区,也是我国典型的生态脆弱区^[27-29]。三峡工程建设使得三峡库区水域面积大幅度增加,局地气候发生了显著变化,土地覆被类型发生明显改变,加之全球气候变化的叠加效应,类似2006年和2011年的极端干旱、洪水等扰动事件有增加趋势^[30-31]。在这一背景下,对三峡库区植被及其恢复力进行监测对维持区内生态系统稳定,减少可能出现的生态风险具有重要的现实意义,然而类似的研究相对较少。

基于临界慢化模型和最新遥感观测进展可以使人们更加科学准确对植被恢复力进行定量估算,进而在大尺度上开展监测。本文选取三峡库区为研究区,研究以下内容:1.基于长时间序列GLASS LAI数据对三峡库

区 LAI 进行时空分析,探讨研究区的植被分布及变化情况。2.基于临界慢化模型,利用长时间序列 GLASS LAI 数据计算三峡库区植被恢复力,从空间上对三峡库区的植被恢复力进行分析,并探讨该区域恢复力的差异原因。3.通过案例模型对临界慢化模型的精度进行验证,探索临界慢化理论植被恢复力遥感定量估算方法的适用性,为三峡库区制定相应生态环境管理决策提供理论基础,为保障西南地区生态安全提供决策依据。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究区概况

三峡库区位于四川盆地与长江中下游平原的结合部,涉及重庆市和湖北省的 28 个县(市、区),范围为东经 $106^{\circ}16'—111^{\circ}28'$,北纬 $28^{\circ}56'—31^{\circ}44'$,总面积约 5.8 km^2 (图 1)。地貌方面,三峡库区处于大巴山褶皱带、川东平行岭谷和川鄂湘黔隆起褶皱带三大构造单元的交汇处,地形东高西低;海拔范围约 $50—2900 \text{ m}$,山地约占 74%、丘陵约占 22%、平原和坝地仅占 4%^[32—34]。气候方面,三峡库区处于中亚热带湿润季风气候区,气温分布西北高东南低;年降水量 $1000—1300 \text{ mm}$,东南部和西北部较多,东北部和西南部较少^[30, 35—36]。

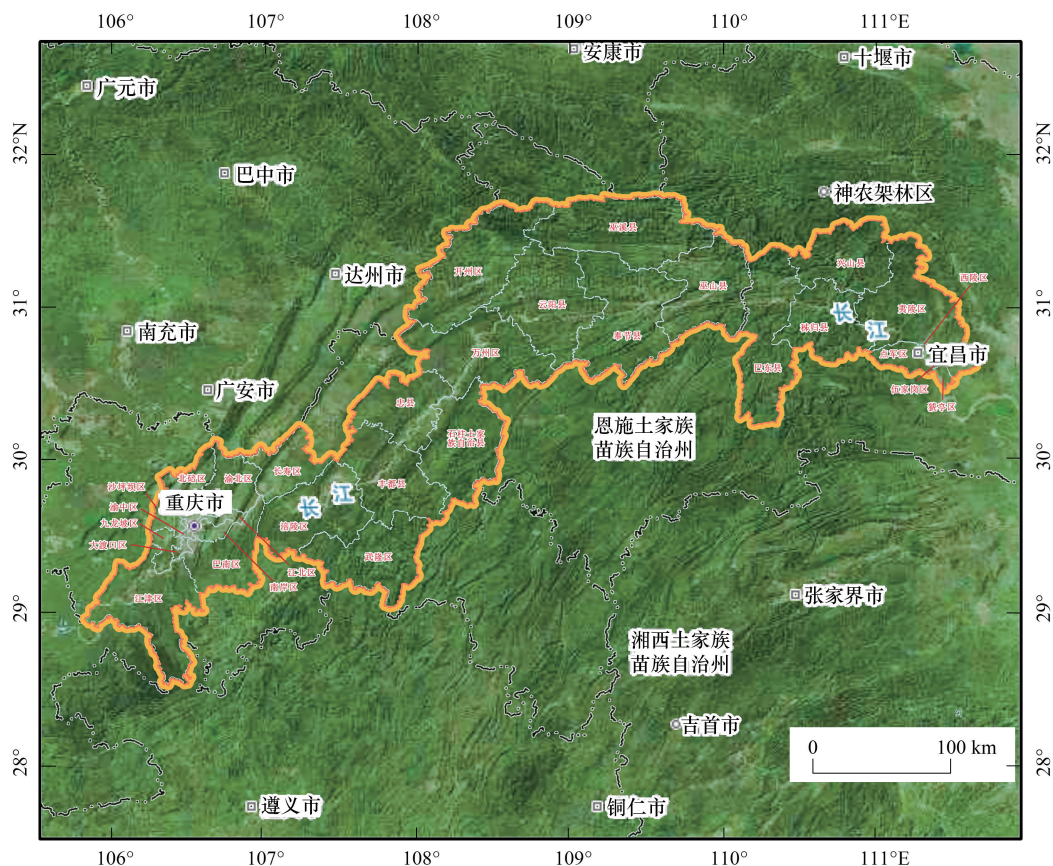


图 1 三峡库区地理位置

Fig.1 The location of the Three Gorges Reservoir Area (TGRA)

植被方面,三峡库区植被类型众多,主要植被类型为暖温性常绿针叶林、典型落叶阔叶林、灌木林,分别占三峡库区总面积的 48.8%、16.6%、14.5%^[37—39]。库区地带性植被是常绿阔叶林,但过度开发导致原始植被生态系统遭到严重破坏与干扰,天然林面积极少,多处于次生状态。植被类型中针叶林比重较大,而阔叶林比重较小,由于大范围的人工造林、飞播造林、退耕还林,库区林种结构比较单一^[27, 40—41]。

1.2 数据来源

1.2.1 叶面积指数(LAI)

在目前已有的遥感植被参数中,考虑到数据精度、覆盖时间范围、产品精度等因素,本文选取叶面积指数

(LAI)来表征植被状态计算陆表植被恢复力(以下简称“植被恢复力”)。具体的,使用全球陆表特征参量产品 GLASS MODIS LAI(以下简称“GLASS LAI”)数据,该数据时间范围为 2000—2018 年,时间分辨率为 8 d,空间分辨率为 500m^[42—45]。该产品基于人工神经网络方法生产,数据时间序列长且精度较高,能够反映植被总体特征,进行长时间序列的分析^[46—47]。

1.2.2 土地覆被数据

土地覆被数据使用 30m 全球地表覆盖数据(GlobeLand30)。GlobeLand30 数据分为 2000、2010、2020 三期,空间分辨率 30m,土地覆被/利用包括 10 个类型:耕地、林地、草地、灌木地、湿地、水体、苔原、人造地表、裸地、冰川和永久积雪^[48—49]。这套数据集在国际同类产品空间中分辨率较高,总体分类精度达 80%以上^[50]。

1.2.3 DEM 数据

DEM 数据使用 ALOS PALSAR 12.5m DEM。该数据由 Alaska Satellite Facility 生产,来源于 ALOS 卫星的相控阵型 L 波段合成孔径雷达(PALSAR)数据,空间分辨率 12.5m,在同类型数据中拥有较高的空间分辨率。本文利用该 DEM 数据计算三峡库区地形坡度。

1.2.4 地质灾害数据

本文对 1982 年至今三峡库区所发生的重大滑坡地质灾害进行收集与整理,选取了两个比较典型的滑坡(白家包滑坡、千将坪滑坡)进行分析,利用谷歌地球卫星与实地调查数据确定滑坡的影响区域。

1.3 研究方法

1.3.1 时间序列分解

临界慢化模型要求时间序列数据必须为平稳序列,因此其趋势和周期信息必须被有效剔除。本文采用基于局部多项式回归拟合模型(LOESS)对 GLASS LAI 数据进行时间序列分解^[51]。该方法在时间序列分解过程中不受异常值和空缺值的影响,对非线性趋势适用性强。此外该方法结构简单,运算速度快,相较普通的基于最小二乘法的时间序列分解有更强的实用性^[52—53]。上述过程通过 R 语言中的 stats 包实现^[54]。

1.3.2 KPSS 检验

为保证时间序列分解的效果,需要对剩余项进行平稳性检验。KPSS 检验是一种非参数检验方法,其原理是用从待检验序列中剔除截距项和趋势项的序列 $\{e_t\}$ 构造 LM 统计量,通过检验残差的估计序列 $\{e_t\}$ 是否存在单位根,从而判断原序列的平稳性^[55]。具体的, KPSS 假设原时间序列是平稳的,其四个置信区间(10%, 5%, 2.5%, 1%)和其所对应的临界值分别为(0.347, 0.463, 0.574, 0.739)。如果检验统计量大于临界值,则拒绝原假设(序列不是平稳的)。如果检验统计量小于临界值,则不能拒绝原假设(序列是平稳的)。本文选取 10%的置信区间进行 KPSS 检验,通过 R 语言中的 urca 包实现^[56]。

1.3.3 临界慢化模型

临界慢化理论表明植被恢复力变化时,植被遭受扰动胁迫后会出现的频繁波动、恢复速率波动等特征现象^[22]。植被恢复力降低时,在遭受扰动后发生稳态转化的几率增加,即吸引盆地很小,受到小扰动时的恢复速度要比吸引盆地较大慢。这种影响可以在系统状态的随机诱导波动中测量,如“记忆”能力和方差的增加。这时植被受到扰动后的恢复速率变慢,当前时刻与上一时刻的相似性增大,即植被“记忆”能力增高,在数学统计上可表现为植被指数的时间自相关性增高^[21](图 2)。时间自相关指数取值范围为 $[-1, 1]$,当值在 $[0, 1]$ 时表示时间正相关,说明区内植被时间自相关性较高;值在 $[-1, 0)$ 时表示时间负相关,说明区内植被时间自相关性较低^[23, 57—58]。本文采用 t 与 $t-1$ 的时间自相关指数 $AR(1)$ 作为植被恢复力的指示因子。

1.3.4 案例模型

案例模型基于恢复力的定义^[60—61],即监测 LAI 在可恢复情况下的最大异常程度(M_s)以及从最大异常到恢复正常范围的时间长度(R_t)两个变量,通过这两个变量的比值计算恢复力(图 3)。利用上述方法监测到的 LAI 异常情况通常分为两种:即 LAI 高于正常浮动范围和 LAI 低于正常浮动范围。本文仅把 LAI 低于正常浮动范围的情况定义为受自然扰动发生的植被异常。关于 LAI 的正常浮动范围,本文采用 LAI 的 2000—

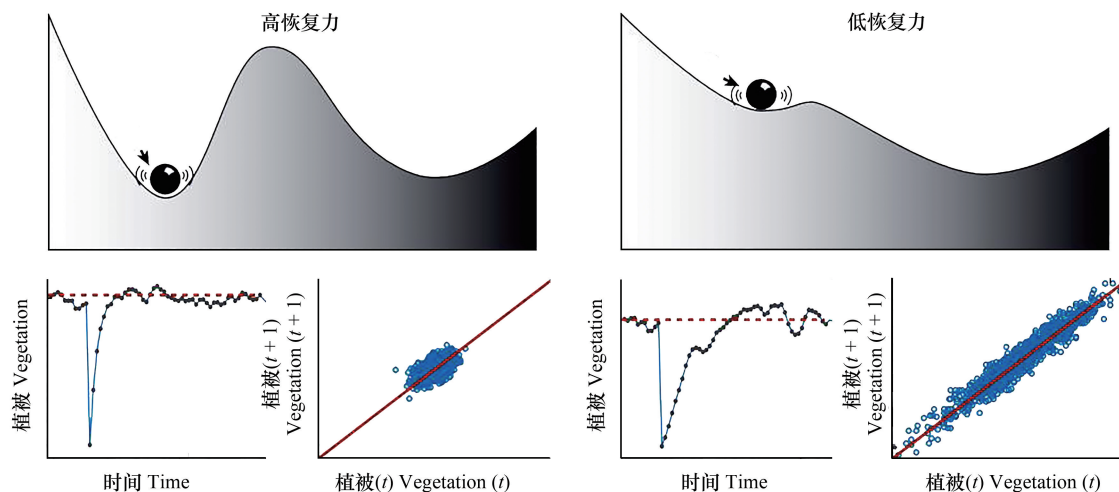
图2 临界慢化模型示意图^[59]

Fig.2 The schematic of Critical Slowing Down model

2018 年月平均值和月标准差两个指标来确定其变化的正常浮动范围。当 LAI 低于正常浮动范围时,确定 LAI 的最低值作为植被恢复的时间起点,把这一时刻 LAI 最低值与浮动范围下边界的差值定义为 LAI 在可恢复情况下的最大异常程度 (M_s)。同时把 LAI 回到多年平均值的时间点作为扰动恢复的时间终点,把时间起点到时间终点的这段时间长度定义为从最大异常到恢复正常范围的时间长度 (R_t),上述两变量的比值即为时间起点时的恢复力^[62]。

$$M_s = \text{MEAN}_j - \text{LAI}_{ij(\text{lowest})} - \text{STD}_j$$

$$R = M_s / R_t$$

$\text{LAI}_{ij(\text{lowest})}$ 是 i 年 j 月 LAI 异常中的最低值, MEAN_j 是选取的 2000—2018 年间 j 月 LAI 平均值, STD_j 是 2000—2018 年间 j 月 LAI 标准差。

2 结果分析

2.1 三峡库区 LAI 时空分布

2000—2018 年 GLASS LAI 平均值显示,三峡库区整体 LAI 为 3.4(图 4)。自然地理格局上,三峡库区重庆段 LAI 较低,湖北段 LAI 值较高。三峡库区是典型的生态脆弱区,水土流失易发多发,三峡库区重庆段水土流失率(水土流失面积占土地总面积的比率)为 34.49%,高于全国 28.6% 的平均水平,也高于全市和毗邻的四川、贵州和湖北,更远高于长江流域 15.8% 的平均水平^[63—65],是长江经济带和长江上游水土流失最为严重的区域,从重庆段 LAI 和湖北段 LAI 的比较结果可以侧面反应出水土流失严重程度。此外,重庆段耕地面积较大,其面积占重庆段总面积的 43.82%,而湖北段森林面积较大,其面积占湖北段总面积的 72.83%。库区中靠近长江区域 LAI 较低,大部分在 2.21 以下,这些区域地形坡度普遍超过 15° (图 4),植被难以生长;外围区域 LAI 值较高,普遍高于 2.21。行政区划上,宜昌市猇亭区、宜昌市兴山县、重庆市巫溪县 LAI 较高,分别为 4.24、4.17、3.95。这些地区大部分为山区,地势较高,生产建设强度小,植被状况相对较好。重庆市渝中区、大渡口区、江北区 LAI 较低,分别为 0.34、1.53、1.72,这些区县主要位于重庆主城区及周边区域,城镇建设用血量

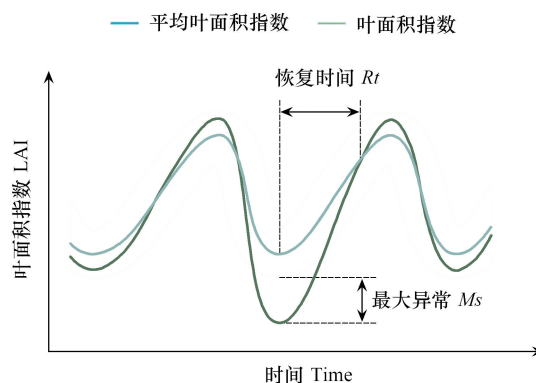
图3 恢复力概念示意图^[62]

Fig.3 The schematic of vegetation resilience concept

高^[66-67],占比分别为 78.77%、44.97%、43.27%(图 4,图 5)对原有的自然植被破坏严重,LAI 较低。

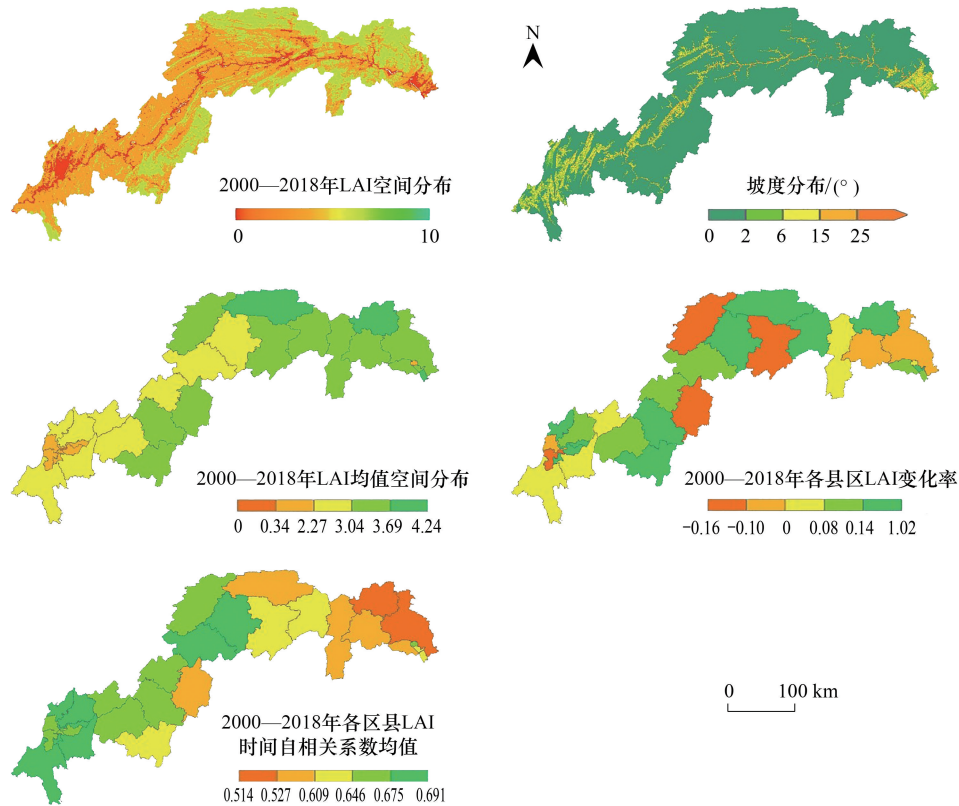


图 4 三峡库区植被及地形分布图

Fig.4 Spatial distribution of vegetation and topography in the TGRA

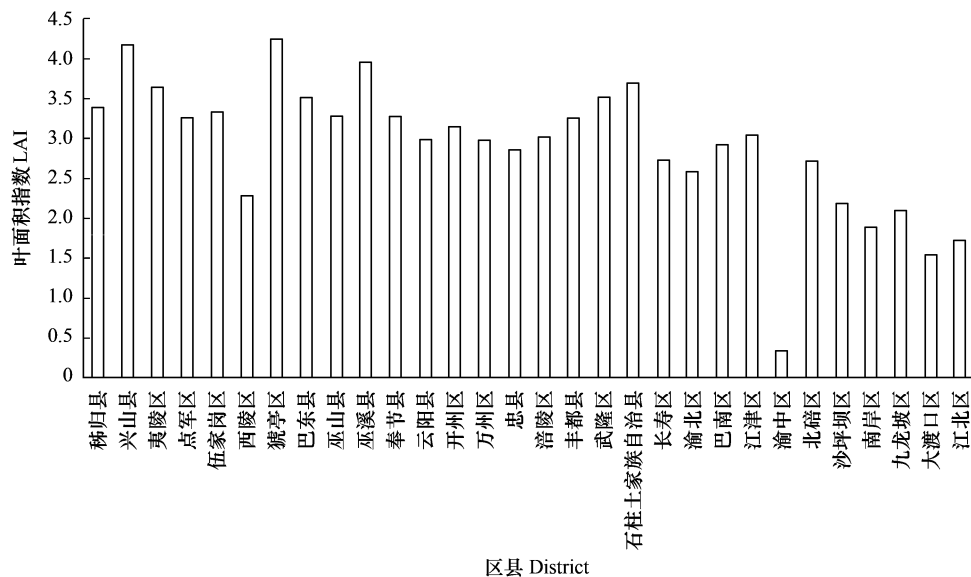


图 5 三峡库区 2000—2018 年各区县 LAI 均值统计

Fig.5 Statistics of 2000—2018 mean LAI in the TGRA districts

2000—2018 年 GLASS LAI 变化速率显示(图 4),三峡库区整体 LAI 呈上升趋势,这意味着三峡库区植被状况在 2000—2018 年间呈现变好的态势。自然地理格局上,三峡库区重庆段 LAI 呈现降低趋势,显著下降区

域占重庆段面积的 21.75%,湖北段 LAI 呈现升高趋势,显著上升区域占湖北段面积的 21.22%。行政区划上,2000—2018 年大部分区县 LAI 都呈上升趋势,其中宜昌市伍家岗区和重庆市云阳县 LAI 增速较高,增速分别为 1.02/年和 0.22/年,伍家岗区 2000—2018 年森林面积占比由 13.21%增加到了 15.41%,云阳县 2000—2018 年森林面积占比由 35.78%增加到了 39.23%;重庆石柱土家族自治县、九龙坡区、奉节县、开州区和宜昌市秭归县 LAI 呈下降趋势,降速分别为 0.16/年、0.14/年、0.13/年、0.11/年和 0.10/年,石柱土家族自治县 2000—2018 年森林、草地面积占比由 67.72%下降到 67.10%,九龙坡区 2000—2018 年森林、草地面积占比由 15.97%下降到 11.59%,奉节县 2000 年—2020 年森林、草地面积占比由 69.02%下降到 68.79%,开州区 2000—2018 年森林、草地面积占比由 53.40%下降到 52.91%,秭归县 2000—2018 年森林、草地面积占比由 70.18%下降到 69.85%。

2.2 时间序列分解及 KPSS 检验

采用基于局部多项式回归拟合模型(LOESS)对三峡库区各区县 2000—2018 年 GLASS LAI 数据进行时间序列分解,将时间序列 GLASS LAI 数据分解为三部分:趋势项、周期项和残差项,并对各区县的 GLASS LAI 残差项进行 KPSS 检验。结果显示,三峡库区各区县 LAI 残差项均通过了 KPSS 检验,说明其所对应的时间序列都是平稳的(表 1)。

表 1 三峡库区各区县时间序列 LAI 残差项 KPSS 检验结果

Table 1 KPSS test of LAI reminder in districts

区县 District	KPSS 检验 KPSS	区县 District	KPSS 检验 KPSS	区县 District	KPSS 检验 KPSS
秭归县	0.0096	奉节县	0.0096	渝北区	0.0139
兴山县	0.0087	云阳县	0.01	巴南区	0.0123
夷陵区	0.0085	开州区	0.0106	江津区	0.0118
点军区	0.0087	万州区	0.0123	渝中区	0.0136
伍家岗区	0.0102	忠县	0.0165	北碚区	0.0124
西陵区	0.0162	涪陵区	0.0144	沙坪坝区	0.0224
猗亭区	0.0136	丰都县	0.0119	南岸区	0.0206
巴东县	0.0094	武隆区	0.0116	九龙坡区	0.0179
巫山县	0.0104	石柱土家族自治县	0.0107	大渡口区	0.0168
巫溪县	0.0084	长寿区	0.0154	江北区	0.0161

2.3 三峡库区植被恢复力空间分布

2000—2018 年 GLASS LAI 时间自相关指数显示,自然地理格局上,三峡库区湖北段 LAI 时间自相关指数较低,重庆段 LAI 时间自相关指数较高(图 4)。行政区划上,重庆市北碚区、大渡口区、渝北区 LAI 时间自相关指数较高,都为 0.69;宜昌市兴山县、夷陵区、点军区 LAI 时间自相关指数较低,分别为 0.51、0.53、0.59。根据临界慢化理论,LAI 时间自相关指数高说明植被受到扰动后 t 时刻状态与 t-1 时刻状态相似性较高,即恢复速率较慢,则恢复力低,反之则相反。因此,LAI 时间自相关指数表明三峡库区中,重庆市北碚区、大渡口区、渝北区植被恢复力较低,宜昌市兴山县、夷陵区、点军区植被恢复力较高(图 6)。整体来看,三峡库区重庆段的植被种类以及植被数量较少,且水土流失严重,导致生态系统的稳定性较差,植被恢复力较低。湖北段大部分位于山区,地势较高,且植被数量与种类都比较多^[28,68—69],同时受到的人为活动影响较小,生态系统稳定性好,植被恢复力较高。此外,三峡库区重庆段人为活动剧烈,尤其是北碚区、大渡口区、渝北区等中心城区以及周边区域,大面积土地被用来进行生产建设,生态环境受到严重影响。而湖北段本身地势较高,不适合进行生产建设等活动,随着库区坡耕地改造、退耕还林(草)天然林保护步伐加快,耕地面积和农作物总播种面积持续减少,库区生态环境得到改善^[31,36]。

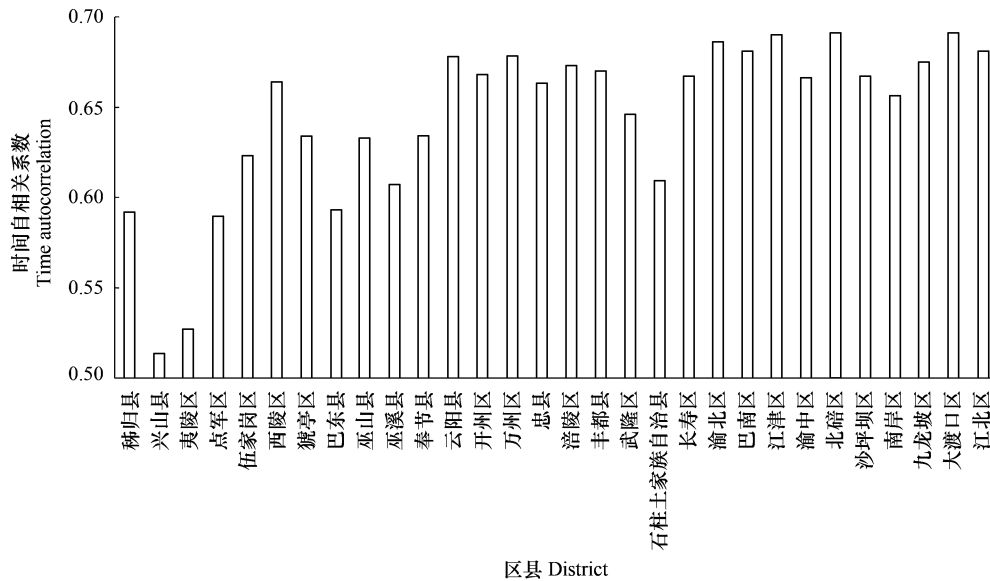


图6 三峡库区2000—2018年各区县LAI时间自相关系数

Fig.6 Statistics of LAI time autocorrelation in the TGRA districts

表2 案例模型与临界慢化模型比较

Table 2 The comparison between case model and Critical Slowing Down model

滑坡 Landslide	最大异常/叶面积指数 MS/LAI	恢复时间/月 RT/month	案例模型 MS/RT	时间自相关 AR(1)
白家包	0.07	7	0.01	0.62
千将坪	0.17	7	0.02	0.55

2.4 精度及不确定性分析

案例模型虽然无法解决扰动的叠加效应,但对单次扰动后植被恢复能力监测精度较高。同时,临界慢化模型虽有便于遥感数据计算等优势,但目前的研究成果还停留在理论分析阶段。因此为验证临界慢化模型在实践中的适用性,本文尝试选取较大的扰动事件,分别用案例模型和临界慢化模型计算恢复力指数。由于2000—2018年三峡库区没有较大规模的火灾事件,干旱事件又受限于尚无适合三峡库区尺度的高精度数据集,最终本文选取了三峡库区的两次较大的滑坡事件:2003年白家包滑坡和千将坪滑坡(图7)。2003年6月,宜昌市秭归县白家包发生滑坡,滑坡覆盖面积 0.22km^2 ;同年7月,宜昌市秭归县千将坪发生滑坡,滑坡覆盖面积 0.46km^2 。两次滑坡基于案例模型的恢复力指数分别为0.01、0.02,基于临界慢化模型的恢复力指数分别为0.62、0.55,结果显示基于两种模型的恢复力指数呈显著负相关(表2),由于临界慢化模型表明时间自相关与恢复力呈负相关关系,因此表明通过案例模型的验证临界慢化模型在植被恢复力(具体来说,是植被针对滑坡扰动的恢复力)监测实践中具有良好的适用性。

需要注意的是,本文仅关注不使生态系统发生跃迁的自然扰动^[10, 59],受人类活动重度影响的区域的植被恢复力不在本文关注讨论的范畴之内,因此三峡库区各区县内人类活动重度影响区域(耕地、人造地表)的面积占比可作为本文植被恢复力监测不确定性的指标之一。行政区划上,渝中区、点军区、巫溪县人类活动重度影响区域面积占比较高,分别为62.59%、22.58%、18.19%,基于临界慢化模型的植被恢复力监测结果在这些区域误差较大;九龙坡区、沙坪坝区、渝北区人类活动重度影响区域面积占比较低,分别为0.98%、1.24%、1.36%,基于临界慢化模型的植被恢复力监测结果在这些区域拥有较高的可信度。

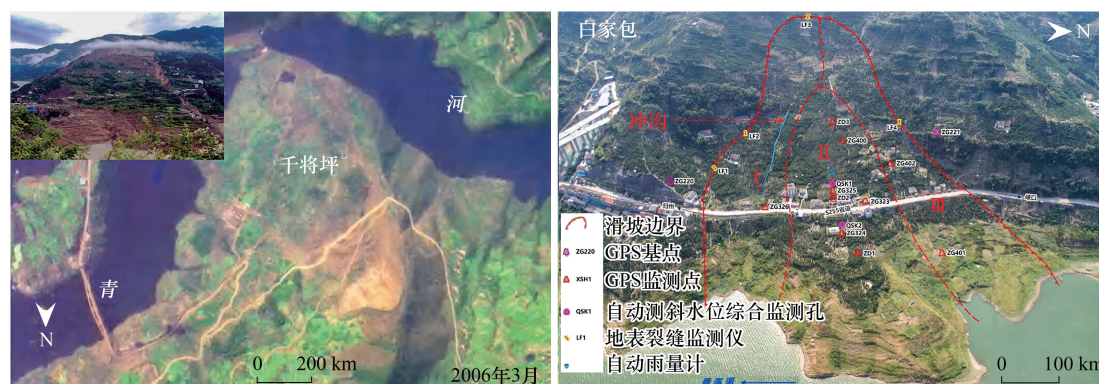
图7 千将坪、白家包滑坡遥感影像^[70-71]

Fig.7 Remote sensing images of Qianjiangping landslide and Baijiabao landslide

3 结论与讨论

3.1 结论

(1) 植被方面,2000—2018 年三峡库区 LAI 平均值为 3.4,重庆段 LAI 较低,湖北段 LAI 值较高;三峡库区 LAI 整体呈上升趋势,重庆段 LAI 呈现降低趋势,显著下降区域占重庆段面积的 21.75%,湖北段 LAI 呈现升高趋势,显著上升区域占湖北段面积的 21.22%;

(2) 植被恢复力方面,2000—2018 年三峡库区重庆市北碚区、大渡口区、渝北区植被恢复力较低,GLASS LAI 时间自相关指数都为 0.69,宜昌市兴山县、夷陵区、点军区植被恢复力较高,GLASS LAI 时间自相关指数分别为 0.51、0.53、0.59;

(3) 在两个地质灾害扰动事件中,案例模型结果与临界慢化模型结果呈现较高的相关性,即对通过案例模型对临界慢化模型在恢复力监测上的有效性进行了验证,表明临界慢化模型在植被恢复力监测实践中具有良好的适用性。

3.2 讨论

少数开展大尺度植被恢复力监测的研究集中在生态学领域,多源遥感数据、定量遥感产品应用深度不足^[10-11,72]。本文使用的 GLASS MODIS LAI,是我国自主研发的高质量遥感数据产品,时间和空间精度都优于其他同类产品,在生产时进行了去云雪影,填补缺失,滤波处理等工作,减少了可能增加误差的预处理。相较于利用临界慢化模型以 NDVI 作为数据源来估算植被恢复力,LAI 具有实际的物理意义,能够反应单位面积土地上植物叶片总面积占土地面积的倍数,且避免了高值区域饱和现象,本研究将遥感领域的新进展应用于植被恢复力监测实践中。本文在对三峡库区各区县植被恢复力进行计算时未剔除建设用地、农田等人为活动干扰剧烈的区域,因此植被恢复力时空分布的结论包含了人类活动、地形地貌、气候变化等多重因素的影响,未来研究可将建设用地、农田等土地覆被类型剔除从而对植被恢复力在自然扰动背景下的变化进行更精确的分析。

基于临界慢化模型的植被恢复力指标种类比较丰富(如时间自相关指数、变异系数、空间自相关指数等),且适合在栅格数据上进行计算,这为大尺度植被恢复力遥感监测提供了一条新思路。但目前基于临界慢化理论的植被恢复力监测研究大多还停留在斑块尺度,大尺度研究十分缺乏^[73]。本文以三峡库区为例,利用长时间序列 GLASS LAI 数据、土地利用数据、DEM 数据以及地质灾害数据,通过临界慢化模型计算植被恢复力,并用具体案例模型来对临界慢化模型精度进行验证,分析了三峡库区植被及其恢复力的时空分布特征,在多时空尺度条件下,利用更加完善的模型进行植被恢复力动态监测方面提供了参考,为三峡库区今后制定相关生态环境保护政策提供了理论依据。

参考文献 (References):

- [1] 方精云, 朱江玲, 石岳. 生态系统对全球变暖的响应. 科学通报, 2018, 63(2): 136-140.
- [2] 陈效述, 王恒. 1982—2003 年内蒙古植被带和植被覆盖度的时空变化. 地理学报, 2009, 64(1): 84-94.
- [3] 张含玉, 方怒放, 史志华. 黄土高原植被覆盖时空变化及其对气候因子的响应. 生态学报, 2016, 36(13): 3960-3968.
- [4] 张琨, 吕一河, 傅伯杰. 黄土高原典型区植被恢复及其对生态系统服务的影响. 生态与农村环境学报, 2017, 33(1): 23-31.
- [5] Walker B, Holling C S, Carpenter S R, Kinzig A. Resilience, adaptability and transformability in social - ecological systems. Ecology and Society, 2004, 9(2): 5.
- [6] Holling C S. Resilience and stability of ecological systems. Annual Review of Ecology and Systematics, 1973, 4: 1-23.
- [7] Pimm S L. The complexity and stability of ecosystems. Nature, 1984, 307(5949): 321-326.
- [8] Carpenter S, Walker B, Anderies J M, Abel N. From metaphor to measurement: resilience of what to what? Ecosystems, 2001, 4(8): 765-781.
- [9] Willis K J, Jeffers E S, Tovar C. What makes a terrestrial ecosystem resilient? Science, 2018, 359(6379): 988-989.
- [10] Díaz-Delgado R, Lloret F, Pons X, Terradas J. Satellite evidence of decreasing resilience in Mediterranean plant communities after recurrent wildfires. Ecology, 2002, 83(8): 2293-2303.
- [11] Bisson M, Fornaciai A, Coli A, Mazzarini F, Pareschi M T. The Vegetation Resilience after Fire (VRAF) index: development, implementation and an illustration from central Italy. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2008, 10(3): 312-329.
- [12] 曹坤芳, 常杰. 突发气象灾害的生态效应: 2008 年中国南方特大冰雪灾害对森林生态系统的破坏. 植物生态学报, 2010, 34(2): 123-124.
- [13] Schwalm C R, Anderegg W R L, Michalak A M, Fisher J B, Biondi F, Koch G, Litvak M, Ogle K, Shaw J D, Wolf A, Huntzinger D N, Schaefer K, Cook R, Wei Y X, Fang Y Y, Hayes D, Huang M Y, Jain A, Tian H Q. Global patterns of drought recovery. Nature, 2017, 548(7666): 202-205.
- [14] Gunderson L H. Ecological resilience-in theory and application. Annual Review of Ecology and Systematics, 2000, 31: 425-439.
- [15] 葛怡, 史培军, 徐伟, 刘婧, 钱瑜, 陈磊. 恢复力研究的新进展与评述. 灾害学, 2010, 25(3): 119-124, 129-129.
- [16] 闫海明, 战金艳, 张韬. 生态系统恢复力研究进展综述. 地理科学进展, 2012, 31(3): 303-314.
- [17] 徐雅晴. 植被恢复力遥感测度模型研究. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
- [18] Zscheischler J, Reichstein M, Harmeling S, Rammig A, Tomelleri E, Mahecha M D. Extreme events in gross primary production: a characterization across continents. Biogeosciences, 2014, 11(11): 2909-2924.
- [19] Miyasaka H, Dzyuba Y V, Genkai-Kato M, Ito S, Kohzu A, Anoshko P N, Khanayev I V, Shubenkov S G, Melnik N G, Timoshkin O A, Wada E. Feeding ecology of two planktonic sculpins, *Comephorus baicalensis* and *Comephorus dybowskii* (Comephoridae), in Lake Baikal. Ichthyological Research, 2006, 53(4): 419-422.
- [20] Bestelmeyer B T, Duniway M C, James D K, Burkett L M, Havstad K M. A test of critical thresholds and their indicators in a desertification - prone ecosystem: more resilience than we thought. Ecology Letters, 2013, 16(3): 339-345.
- [21] Scheffer M, Bascompte J, Brock W A, Brovkin V, Carpenter S R, Dakos V, Held H, Van Nes E H, Rietkerk M, Sugihara G. Early-warning signals for critical transitions. Nature, 2009, 461(7260): 53-59.
- [22] Veraart A J, Faassen E J, Dakos V, Van Nes E H, Lüring M, Scheffer M. Recovery rates reflect distance to a tipping point in a living system. Nature, 2012, 481(7381): 357-359.
- [23] Hu Z M, Guo Q, Li S G, Piao S, Knapp A K, Ciais P, Li X R, Yu G R. Shifts in the dynamics of productivity signal ecosystem state transitions at the biome - scale. Ecology Letters, 2018, 21(10): 1457-1466.
- [24] Donangelo R, Fort H, Dakos V, Scheffer M, Van Nes E H. Early warnings for catastrophic shifts in ecosystems: comparison between spatial and temporal indicators. International Journal of Bifurcation and Chaos, 2010, 20(2): 315-321.
- [25] 徐驰, 王海军, 刘权兴, 王博. 生态系统的多稳态与突变. 生物多样性, 2020, 28(11): 1417-1430.
- [26] Smith T, Traxl D, Boers N. Empirical evidence for recent global shifts in vegetation resilience. Nature Climate Change, 2022, 12(5): 477-484.
- [27] 陈雅如. 三峡库区森林生产力与碳储量对景观格局变化的响应. 北京: 中国林业科学研究院, 2017.
- [28] 马骏, 李昌晓, 魏虹, 马朋, 杨予静, 任庆水, 张雯. 三峡库区生态脆弱性评价. 生态学报, 2015, 35(21): 7117-7129.
- [29] 卢刚, 徐高福, 刘乐群, 张建和, 李贺鹏, 柏明娥, 洪利兴. 中国水库消落带植被恢复研究进展. 浙江林业科技, 2016, 36(1): 72-80.
- [30] Song Z, Liang S L, Feng L, He T, Song X P, Zhang L. Temperature changes in Three Gorges Reservoir Area and linkage with Three Gorges

- Project. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2017, 122(9): 4866-4879.
- [31] Xu X B, Tan Y, Yang G S. Environmental impact assessments of the Three Gorges Project in China: issues and interventions. *Earth-Science Reviews*, 2013, 124: 115-125.
- [32] 王国庆, 张建云, 贺瑞敏, 刘翠善, 王小军. 三峡水利工程对区域气候影响的初步分析//自主创新与持续增长第十一届中国科协年会论文集(1). 重庆: 中国科学技术协会学会学术部, 2009.
- [33] Bao Y H, Gao P, He X B. The water-level fluctuation zone of Three Gorges Reservoir—a unique geomorphological unit. *Earth-Science Reviews*, 2015, 150: 14-24.
- [34] Gu D M, Huang D, Yang W D, Zhu J L, Fu G Y. Understanding the triggering mechanism and possible kinematic evolution of a reactivated landslide in the Three Gorges Reservoir. *Landslides*, 2017, 14(6): 2073-2087.
- [35] Miller N L, Jin J M, Tsang C F. Local climate sensitivity of the Three Gorges Dam. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(16): L16704.
- [36] Han G F, Yang Y C, Yan S Y. Vegetation activity trend and its relationship with climate change in the Three Gorges Area, China. *Advances in Meteorology*, 2013, 2013: 235378.
- [37] 陈亮中. 三峡库区主要森林植被类型土壤有机碳研究. 北京: 北京林业大学, 2007.
- [38] Chen M Y, Zeng L X, Huang Z L, Lei L, Shen Y F, Xiao W F. Evaluating suitability of land for forest landscape restoration: a case study of Three Gorges Reservoir, China. *Ecological Indicators*, 2021, 127: 107765.
- [39] Zhu Z H, Chen Z L, Li L, Shao Y. Response of dominant plant species to periodic flooding in the riparian zone of the Three Gorges Reservoir (TGR), China. *Science of the Total Environment*, 2020, 747: 141101.
- [40] Wen Z F, Wu S J, Chen J L, Lü M Q. NDVI indicated long-term interannual changes in vegetation activities and their responses to climatic and anthropogenic factors in the Three Gorges Reservoir Region, China. *Science of the Total Environment*, 2017, 574: 947-959.
- [41] Wang J Z, Zhang Q, Gou T J, Mo J B, Wang Z F, Gao M. Spatial-temporal changes of urban areas and terrestrial carbon storage in the Three Gorges Reservoir in China. *Ecological Indicators*, 2018, 95: 343-352.
- [42] 梁顺林, 张晓明, 肖志强, 程洁, 刘强, 赵祥. 全球陆表特征参量(GLASS)产品算法、验证与分析. 北京: 高等教育出版社, 2014.
- [43] Liang S L, Cheng J, Jia K, Jiang B, Liu Q, Xiao Z Q, Yao Y J, Yuan W P, Zhang X T, Zhao X, Zhou J. The global land surface satellite (GLASS) product suite. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2021, 102(2): E323-E337.
- [44] Xiao Z Q, Liang S L, Wang J D, Chen P, Yin X J, Zhang L Q, Song J L. Use of general regression neural networks for generating the GLASS leaf area index product from time-series MODIS surface reflectance. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(1): 209-223.
- [45] Liang S L, Li X W, Wang J D. *Advanced Remote Sensing: Terrestrial Information Extraction and Applications*. Oxford: Academic Press, 2012.
- [46] Xiao Z Q, Liang S L, Jiang B. Evaluation of four long time-series global leaf area index products. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 246: 218-230.
- [47] Xu B D, Li J, Park T, Liu Q H, Zeng Y L, Yin G F, Zhao J, Fan W L, Yang L, Knyazikhin Y, Myneni R B. An integrated method for validating long-term leaf area index products using global networks of site-based measurements. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 209: 134-151.
- [48] 陈军, 陈晋, 廖安平. 全球地表覆盖遥感制图. 北京: 科学出版社, 2016.
- [49] Jun C, Ban Y F, Li S N. Open access to Earth land-cover map. *Nature*, 2014, 514(7523): 434.
- [50] Xie H, Tong X H, Meng W, Liang D, Wang Z H, Shi W Z. A multilevel stratified spatial sampling approach for the quality assessment of remote-sensing-derived products. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2015, 8(10): 4699-4713.
- [51] Cleveland R B, Cleveland W S, Terpenning I. STL: a seasonal-trend decomposition procedure based on loess. *Journal of Official Statistics*, 1990, 6(1): 3-73.
- [52] Jiang B, Liang S L, Wang J D, Xiao Z Q. Modeling MODIS LAI time series using three statistical methods. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(7): 1432-1444.
- [53] Ben Abbes A, Bounouh O, Farah I R, De Jong R, Martínez B. Comparative study of three satellite image time-series decomposition methods for vegetation change detection. *European Journal of Remote Sensing*, 2018, 51(1): 607-615.
- [54] Team R C. R: A language and environment for statistical computing. 2013.
- [55] Kwiatkowski D, Phillips P C B, Schmidt P, Shin Y. Testing the null hypothesis of stationarity against the alternative of a unit root: How sure are we that economic time series have a unit root? *Journal of Econometrics*, 1992, 54(1/3): 159-178.
- [56] Pfaff B. *Analysis of Integrated and Cointegrated Time Series with R*. 2nd ed. New York: Springer, 2008.
- [57] Scheffer M, Carpenter S R, Dakos V, Van Nes E H. Generic indicators of ecological resilience: inferring the chance of a critical transition. *Annual*

- Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 2015, 46(1): 145-167.
- [58] Ives A R, Dennis B, Cottingham K, Carpenter S R. Estimating community stability and ecological interactions from time - series data. *Ecological Monographs*, 2003, 73(2): 301-330.
- [59] Held H, Kleinen T. Detection of climate system bifurcations by degenerate fingerprinting. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(23): L23207.
- [60] Mageau M T. Development and Testing of A Quantitative Assessment of Ecosystem Health. Maryland: University of Maryland, 1998.
- [61] Wood S N. Generalized Additive Models: An Introduction with R. Boca Raton: Chapman & Hall/CRC, 2006.
- [62] Wu J H, Liang S L. Assessing terrestrial ecosystem resilience using satellite leaf area index. *Remote Sensing*, 2020, 12(4): 595.
- [63] 李月臣, 刘春霞, 赵纯勇, 黄建辉. 三峡库区重庆段水土流失的时空格局特征. *地理学报*, 2008, 63(5): 502-513.
- [64] Shen G Z, Xie Z Q. Three Gorges Project: chance and challenge. *Science*, 2004, 304(5671): 681.
- [65] Degu A M, Hossain F, Niyogi D, Pielke R, Shepherd J M, Voisin N, Chronis T. The influence of large dams on surrounding climate and precipitation patterns. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(4): L04405.
- [66] Dale V H. The relationship between land-use change and climate change. *Ecological Applications*, 1997, 7(3): 753-769.
- [67] Kalnay E, Cai M. Impact of urbanization and land-use change on climate. *Nature*, 2003, 423(6939): 528-531.
- [68] Chen H, Yuan X Z, Chen Z L, Wu Y Y, Liu X S, Zhu D, Wu N, Zhu Q A, Peng C H, Li W Z. Methane emissions from the surface of the three gorges reservoir. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2011, 116(D21): D21306.
- [69] Feng L, Han X X, Hu C M, Chen X L. Four decades of wetland changes of the largest freshwater lake in China: possible linkage to the Three Gorges Dam? *Remote Sensing of Environment*, 2016, 176: 43-55.
- [70] 杨金中, 杨日红. 遥感技术在三峡库区千将坪滑坡研究中的应用. *国土资源遥感*, 2007, (4): 85-89, 125-125.
- [71] 刘伊凡. 三峡库区白家包滑坡变形机制及预测预报研究. 宜昌: 三峡大学, 2019.
- [72] Verbesselt J, Umlauf N, Hirota M, Holmgren M, Van Nes E H, Herold M, Zeileis A, Scheffer M. Remotely sensed resilience of tropical forests. *Nature Climate Change*, 2016, 6(11): 1028-1031.
- [73] Oliver T H, Heard M S, Isaac N J B, Roy D B, Procter D, Eigenbrod F, Freckleton R, Hector A, Orme C D L, Petchey O L, Proença V, Raffaelli D, Suttle K B, Mace G M, Martín-López B, Woodcock B A, Bullock J M. Biodiversity and resilience of ecosystem functions. *Trends in Ecology & Evolution*, 2015, 30(11): 673-684.