DOI: 10.20103/j.stxb.202409042115

吴恬静,刘焱序,王壮壮,姚莹,王晨旭,伏丰玉,王晨光,刘涛.中国重大生态工程区生态系统恢复力变化趋势与影响因素.生态学报,2025,45 (18): - .

Wu T J, Liu Y X, Wang Z Z, Yao Y, Wang C X, Fu F Y, Wang C G, Liu T.Trends and influencing factors of ecosystem resilience in major ecological project areas in China. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(18): - .

中国重大生态工程区生态系统恢复力变化趋势与影响 因素

吴恬静1,刘焱序1,*,王壮壮2,姚 莹1,王晨旭1,伏丰玉1,王晨光3,刘 涛4

1 北京师范大学地理科学学部 地表过程与资源生态国家重点实验室,北京 100875

2 河南大学地理与环境学院,开封 475004

3 中国地质大学(武汉)地理与信息工程学院,武汉 430078

4 四川省第二地质大队 黄河上游若尔盖生态修复野外科学观测研究站,成都 610017

摘要:生态系统恢复力对于维持扰动后生态系统的结构和功能稳定性至关重要,全球范围内生态系统恢复力的降低,给生态系统可持续管理带来较大不确定性。然而,对中国重大生态工程实施区域生态系统恢复力变化的演化趋势和影响因素知之甚少。 以中国九个重大生态工程实施区域为研究区,基于遥感植被指数 kNDVI 和自回归模型系数 AR(1)识别中国重大生态工程实施 区域生态系统恢复力的演化,利用偏相关分析恢复力的影响因素。研究表明:(1)空间分布上,中国生态工程实施区域呈现高 绿度-高恢复力和低绿度-低恢复力的对应模式,绿度越高的工程区往往具备更高的恢复力;三江源生态保护和建设工程、京津 风沙源综合治理工程相对而言处于低绿度和低恢复力。(2)时间趋势上,2000 年以来,中国重大生态工程实施区域生态系统绿 度呈总体上升趋势,恢复力呈波动趋势但总体下降,在 2015 年后恢复力处于 1982 年以来最低范围。(3)影响因素中,大部分生 态工程实施区域的生态系统恢复力对影响因素(降水变率、平均温度、温度变率、土壤湿度、总蒸散发)的响应是非单一性的,表 现为正负偏相关的占比基本持平。平均降水与 AR(1)呈负相关性,即降水富集区的恢复力较强;土壤湿度与 AR(1)的偏相关 显著比例最高。研究结果警示了中国生态工程实施区域的生态系统恢复力持续退化风险,反映了应当将生态系统恢复力纳入 生态修复评估中,采取更加有效合理的生态系统管理策略。

关键词:生态保护与修复;绿度;自回归模型;偏相关;影响因素

Trends and influencing factors of ecosystem resilience in major ecological project areas in China

WU Tianjing¹, LIU Yanxu^{1,*}, WANG Zhuangzhuang², YAO Ying¹, WANG Chenxu¹, FU Fengyu¹, WANG Chenguang³, LIU Tao⁴

1 State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

2 College of Geography and Environmental Science, Henan University, Kaifeng 475004, China

3 School of Geography and Information Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430078, China

4 The 2nd Geological Brigade of Sichuan, Ruoergai Ecological Restoration Field Observation and Research Station, Upper Yellow River, Chengdu 610017, China

Abstract: Ecosystem resilience is essential for maintaining the stability of ecosystem structure and function following disturbances. The decline in global ecosystem resilience introduces significant uncertainty to the sustainable management of

收稿日期:2024-09-04; 网络出版日期:2024-00-00

基金项目:国家重点研发计划项目(2024YFF1309200);国家自然科学基金项目(42041007)

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail: yanxuliu@ bnu.edu.cn

ecosystems. However, little is known about the variation trends and influencing factors of ecosystem resilience in major ecological project areas in China. This study focuses on nine major ecological project areas in China, identifying the variation of ecosystem resilience based on the remote sensing vegetation index kNDVI and the autoregressive model coefficient AR(1), and analyzing the influencing factors of resilience using partial correlation analysis. The study shows that: (1) China's ecological project areas exhibit a corresponding pattern of high greenness-high resilience and low greenness-low resilience. Project areas with higher greenness tend to have higher resilience. The Sanjiangvuan Ecological Protection and Construction Project and the Beijing-Tianjin Sand Source Control Project exhibit relatively low greenness and low resilience. This spatial pattern underscores the strong association between vegetation cover and ecosystem resilience. (2) Since 2000, the greenness of major ecological project areas in China has shown an overall upward trend, while resilience has shown a fluctuating trend but overall decline, with resilience being at its lowest level since 1982 after 2015. This divergence highlights a growing risk of resilience degradation despite improvements in vegetation cover. (3) The response of ecosystem resilience in most ecological project areas to influencing factors such as precipitation variability, mean temperature, temperature variability, soil moisture, and total evapotranspiration is non-unique, with the proportion of positive and negative partial correlation coefficients being approximately equal. Mean precipitation is negatively correlated with AR(1), indicating that areas with abundant precipitation have stronger resilience. Soil moisture has a highest ratio of significant relation with AR(1). These results highlight the risk of continuous degradation of ecosystem resilience in China's ecological project areas, despite improvements in vegetation greenness. This underscores the need to incorporate ecosystem resilience as a core metric in ecological restoration assessments. Developing more effective, region-specific ecosystem management strategies that account for the complex and variable drivers of resilience will be essential to ensure the long-term sustainability of ecological restoration efforts.

Key Words: ecological protection and restoration; greenness; auto-regressive mode; partial correlation; influencing factors

联合国生态恢复十年倡议世界各地对生态系统进行保护和修复,旨在制止生态系统的退化,并对其进行 修复,以实现全球可持续发展目标。从 1978 年三北防护林建设工程实施以来,中国一直致力于实施生态保护 与修复工程支撑生态文明建设,并已取得了显著的成效^[1]。根据第六次和第九次全国森林资源清查结果以 及国家林草局颁布的《2021 年中国林草资源与生态状况》白皮书^[2],21 世纪以来,中国林草生态系统呈现健 康状况向好、质量逐步提升、功能稳步增强的发展态势,全国森林覆盖率由 16.55%提高至 23.04%,森林面积 由 1.5 亿万公顷增加至 2.2 万公顷;草原综合植被盖度达 56.1%;湿地保护率达到 50%以上。

中国大规模生态保护与修复显著提高了工程区的绿度,近二十年来中国占全球叶面积净增加的 25%,其 中 42%来自森林^[3]。从 19 世纪 80 年代以来,由于植树造林和防沙治沙工程,中国超过 45%的旱区经历了土 地改良或植被绿化^[4]。然而生态工程并不是越绿越优,还需要考虑生态系统的稳定性^[5-6]。因此,在生态工 程实施中如何保证生态系统的稳定状态,最大限度地减少干扰的影响,并使生态系统持续为人类提供生态系 统服务已成为各界关注的重要问题^[7-10]。恢复力纳入生态修复工程评估指标体系,从稳定性的角度揭示生 态工程效益,有助于辅助支撑制定生态系统可持续管理方案以应对气候风险^[7,11-12]。

恢复力是生态系统可持续性的关键指标^[13],已有 50 多年的发展历史^[14],并日益受到生态学研究的关注^[15]。在现有研究中,从工程学和生态学角度对生态系统恢复力有两种定义。Holling^[14]认为生态恢复力是 系统在面对干扰时抵抗变化的能力,Pimm^[16-17]则将工程恢复力定义为生态系统在受到干扰后恢复到稳定 状态的速度。恢复力作为科学和政策领域的热点话题^[18-19],已被用作应对全球变化带来的不确定性的解决 方案^[11],并在维持可为人类提供生态系统服务的非静态生态系统方面发挥着重要作用^[20]。生态系统恢复力 的不同定义导致不同的测量方法,如滞后一阶的自相关^[21]、方差^[22]、偏斜度^[23]、峰度^[24]、恢复率^[25]和恢复时 间^[26]。量化生态系统恢复力的局限一直限制着生态系统恢复力概念在决策中的应用^[27-28]。此外,人们在探 索生态系统恢复力的影响因素方面做出了大量努力^[29-31],包括阐明降水^[32]、温度^[33]、生物多样性^[34]和土地 利用^[35]对生态系统恢复力的强烈影响。有研究在黄土高原地区进行了绿度和恢复力的评估,表明绿度的提 升并不等于恢复力的提升^[12]。然而,黄土高原呈现出绿度提升而恢复力下降的特征是中国普遍存在的还是 区域性特征尚未可知。因此,有必要设问:现阶段中国重大生态工程是否总体提升了恢复力?在何时何地提 升了恢复力?是什么自然因素主导的?本研究以中国九个重大生态修复工程区为研究区,分别运用 kNDVI 和滞后一期的自回归模型系数 AR(1)评估生态系统绿度和恢复力的空间分布特征和演化趋势,利用偏相关 分析生态系统恢复力主要影响因素的区域差异。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

基于已有研究发布的中国重大生态工程实施范围,本研究选取了退牧还草工程、退耕还林工程、天然林资 源保护工程、三北防护林建设工程(第四期、第五期)、长江流域防护林体系建设工程(第二期、第三期)、珠江 流域防护林体系建设工程(第二期、第三期)、三江源生态保护和建设工程、西南岩溶石漠化综合治理工程、京 津风沙源综合治理工程等9个重大生态工程实施区域,共涉及全国31个省(自治区、直辖市)^[36]。

1.2 数据来源

本研究采用的植被数据是来自 GIMMS3gv1.2 的 NDVI 遥感数据(https://daac.ornl.gov/cgi-bin/dsviewer. pl? ds_id=2187)^[37],空间分辨率为 1/12°,时间分辨率为 15 天,时间序列为 1982—2022。对 NDVI 遥感数据 进行了合成月最大值、重采样、筛选像元、去季节和长期趋势等预处理。首先,将 NDVI 遥感数据合成为月最 大值,再使用 ArcGIS Pro 中最邻近方法将其重采样至空间分辨率 0.1°。其次,进行三次像元筛选:(1)基于 GLC_FCS30 土地覆盖数据集^[38],使用 ArcGIS Pro 中众数方法将其重采样至空间分辨率 0.1°,并提取出 1985—2020 年保持不变的植被土地像元,包含各类阔叶林、落叶林、针叶林、混交林、灌木等 15 个植被地类; (2) 去除 NDVI 最大值小于 0.2 的像元,认为该像元不存在植被,并去除生长季小于 6 个月的像元,以保证获 得较为可靠的植被像元;(3)检查每个 NDVI 时间序列中的缺失值,选择具有完整 NDVI 时间序列的像元,以 保证后续模型的运算。最后,计算 kNDVI 后采用 STL(Seasonal and Trend decomposition using Loess)分解法, 将 NDVI 时间序列分解成三个主要分量:趋势、季节项和残差。本研究选择 STL 残差分量,代表了去季节和长 期趋势的 kNDVI 时间序列。

土壤湿度和总蒸散发数据来源于国家青藏高原科学数据中心(https://data.tpdc.ac.cn/en/data/bc51e1b0-494c-4cd5-ae4d-eba6b9d2322c)^[39],空间分辨率为0.1°,时间分辨率为月。降水和温度数据来源于 ERA5 再分 析数据集(https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp #! /dataset/reanalysis-era5-land-monthly-means? tab = form),空间分辨率为0.1°,时间分辨率为月。通过降水和温度数据计算降水变率和温度变率(标准差/平均 值)^[40]。

1.3 研究方法

本研究以 kNDVI 反映生态系统绿度的动态变化。GIMMS3gv1 的 NDVI 在热带地区由于光信号饱和影响 而不可靠^[41]。Camps-Valls 等人^[42]提出了一种新的植被指数 kNDVI,由方程(1)计算得到,与 NDVI 和近红外 反射率等替代产品相比,它与初级生产力的关系更密切,在应对饱和、偏差和复杂的物候循环等方面有明显优 势,避免了 NDVI 在生物量高的热带地区出现饱和现象,并在空间和时间尺度上提高了对噪声和不确定性的 稳健性。因此,与 AR(1)保持一致,本研究使用滑动窗口长度为 60 个月的 kNDVI 作为描述生态系统绿度状 态的度量指标。

kNDVI = tanh (NDVI²)

(1)

本研究运用了滞后一期的自回归模型系数 AR(1)评估生态系统恢复力。生态系统存在稳态转化的临界 点,当系统接近临界点时,表现为回到平衡状态的速率趋于减慢,这种现象被称为"临界减速"^[14,43]。恢复力 的损失可以从生态系统状态的时间自相关性增加中检测出来,自相关回归系数 AR(1)的绝对值增加表明系统的状态在连续观测之间变得越来越相似,即 AR(1)的上升趋势表明恢复力下降,AR(1)的下降趋势表明恢复力上升^[44]。因此,本研究使用滑动窗口长度为 60 个月的滞后一期自回归模型来创建 AR(1)系数的时间序列。

$$X_{t+1} = AR(1)X_t + k_t$$
(2)

式中, X_t 为 t 时刻的生态状态序列(kNDVI 时间序列)的子集, X_{t+1} 为滞后 1 期的时间序列, k_t 是回归残差。AR (1)是自回归模型系数,为评估生态系统恢复力提供了一个稳健的指标。

本研究利用 R 语言的 bfast 函数在区域尺度上检测平均 AR(1)时间序列中的突变点,并将 break 设为 1, 只考虑 1 个突变点。本研究运用秩相关系数 Kendall τ 值分析恢复力 AR(1)在断点前后的变化趋势,使不同 地区的恢复力趋势具有可比性^[12]。Kendall τ 取值为 1 表示时间序列一直在增加,-1 表示时间序列一直在减 少,0 表示没有整体趋势。

由于大尺度生态系统退化和恢复区域的生态系统恢复力时间趋势是由气候变化主导的^[45-46],本研究基 于恢复力的影响因素(平均降水、降水变率、平均温度、温度变率、土壤湿度、总蒸散发)进行了偏相关分析,以 确定影响因素在不同区域的表现情况^[47]。与 NDVI 和 AR(1)保持一致,对土壤湿度、总蒸散发、平均降水、降 水变率、平均温度、温度变率均采用 60 个月的滑动窗口计算均值。正(或负)偏相关系数表明 AR(1)与自变 量的变化方向相同(或相反),绝对值越大,相关性越强。

2 结果分析

2.1 生态系统绿度和恢复力的空间分布特征

统计中国生态工程区平均 kNDVI 和 AR(1)(图 1),主要是高 kNDVI 低 AR(1)(高绿度-高恢复力)和低 kNDVI 高 AR(1)(低绿度-低恢复力)的模式,越绿的工程区可能具备更高的恢复力。三江源生态保护和建设 工程、京津风沙源综合治理工程拥有较低的 kNDVI 和较高的 AR(1),即低绿度-低恢复力;珠江流域防护林体 系建设工程、退牧还草工程、西南岩溶石漠化综合治理工程拥有较高的 kNDVI 和较低的 AR(1),即高绿度-高恢复力。





Fig.1 Mean kNDVI and AR(1) in China's ecological restoration project

kNDVI,核归—化差异植被指数;AR(1),自回归模型系数

```
2.2 生态系统绿度和恢复力的演化趋势分析
```

中国重大生态工程区生态系统绿度 kNDVI 呈现总体上升的趋势,而 AR(1)呈现出不同的波动趋势,但大

多在 2015 年后达到了历史新高,即恢复力新低(图 2)。总体上,各个生态工程区的恢复力在断点前后的表现 出前升后降、前降后降、前升后升三种模式。退牧还草工程($tau_{in} = -0.571, tau_{fi} = 0.584$)、退耕还林工程($tau_{in} = -0.240, tau_{fi} = 0.301$)、珠江流域防护林体系建设工程($tau_{in} = -0.665, tau_{fi} = 0.005$)、西南岩溶石漠化综合治 理工程($tau_{in} = -0.696, tau_{fi} = 0.194$)的 AR(1)在断点前下降(恢复力上升),断点后 AR(1)上升(恢复力下降);三北防护林建设工程($tau_{in} = 0.093, tau_{fi} = 0.061$)、天然林资源保护工程($tau_{in} = 0.243, tau_{fi} = 0.754$)、长 江流域防护林体系建设工程($tau_{in} = 0.337, tau_{fi} = 0.681$)、三江源生态保护和建设工程($tau_{in} = 0.441, tau_{fi} = 0.599$)的 AR(1)在断点前后均上升(恢复力下降),但断点后的上升幅度更大。而京津风沙源综合治理工程 的 AR(1)在断点前后均下降(恢复力上升),但断点后的下降幅度更大($tau_{in} = -0.012, tau_{fi} = -0.137$)。





2.3 生态系统恢复力的影响因素分析

本研究统计了各个生态工程区 AR(1)与影响因素(平均降水、降水变率、平均温度、温度变率、土壤湿度、 总蒸散发)的偏相关系数值(P<0.05)的概率密度及显著像元比例(图 3)。各影响因素的偏相关显著像元比 值均较高(66.4%—84.2%),大部分生态工程区的生态系统恢复力对影响因素的响应是非单一性的,正负相关 的占比基本持平。平均降水与 AR(1)的相关性主要是负向的,也就是降水富集区的 AR(1)较低(恢复力较 强)。降水变率与大多生态工程区 AR(1)的正负向相关性比例基本持平,与珠江流域防护林体系建设工程和 京津风沙源综合治理工程 AR(1)的负相关性占优势,也就是降水变率大的区域,AR(1)较高(恢复力较弱)。



图 3 生态系统恢复力与影响因素的偏相关系数分布及显著相关像元比例

Fig.3 Distribution of partial correlation coefficients and proportion of significant correlation pixels between ecosystem resilience and influencing factors

平均温度和温度变率与珠江流域防护林体系建设工程和西南岩溶石漠化综合治理工程 AR(1)的正相关性占优势,也就是较高的平均温度和温度变率会增加这两个生态工程区的 AR(1)(削弱恢复力);而与三江源生态

7

保护和建设工程和京津风沙源综合治理工程 AR(1)的负相关性占优势,平均温度和温度变率的增加会减少 这两个生态工程区的 AR(1),即恢复力增强;与其他生态工程区(退牧还草工程、退耕还林工程、天然林资源 保护工程、三北防护林建设工程、长江流域防护林体系建设工程)AR(1)的正负向相关性基本持平。土壤湿 度在各个生态工程区与 AR(1)的显著相关像元比最高,达 77.8%—84.2%,其中与三北防护林建设工程、三江 源生态保护和建设工程、京津风沙源综合治理工程 AR(1)的正相关性占比更大,与珠江流域防护林体系建设 工程、西南岩溶石漠化综合治理工程的负相关性占比更大,与其他工程区(退牧还草工程、退耕还林工程、天 然林资源保护工程、长江流域防护林体系建设工程)AR(1)的正负向相关性占比差距不大。总蒸散发与三北 防护林建设工程、三江源生态保护和建设工程、京津风沙源综合治理工程 AR(1)的正相关性占主导地位;与 珠江流域防护林体系建设工程、西南岩溶石漠化综合治理工程的负相关性占主导地位;与其他生态工程区 (退牧还草工程、退耕还林工程、天然林资源保护工程、长江流域防护林体系建设工程)AR(1)的正负向相关 性比例基本持平。总之,平均降水与恢复力的关系主要是正向的(即与 AR(1)是负向),大部分中国重大生态 工程区的生态系统恢复力对自然影响因素(平均降水、降水变率、平均温度、温度变率、土壤湿度、总蒸散发) 的响应是非单一性的。

3 讨论与结论

3.1 讨论

有研究表明重大生态工程实施数量越多,实施工程措施越综合,生态恢复程度越高^[36]。但本研究统计了 重大生态工程叠加实施区的平均 kNDVI 和 AR(1)及其变化趋势(图 4),发现叠加过多工程实施区域并不会 加速绿度和恢复力的增长。从静态的空间分布来看(图 4),5个工程实施区具有较低的 kNDVI 和较高的 AR (1),意味着该区域的绿度低、恢复力弱;而 2—3个工程实施的区域拥有较高的 kNDVI 和较低的 AR(1),意 味着该区域的绿度高、恢复力强。从动态的演化趋势来看(图 4),5个工程实施区域的 kNDVI 增长最慢,AR (1)增长最快,也就是该区域的绿度增长缓慢和恢复力快速下降;2—3个工程实施区域的 kNDVI 增长最快, AR(1)增长较慢,也就是该区域的绿度上升趋势较好,但恢复力以低于 5 个工程实施区域的速度在下降。因 此,本研究的证据不支持重大生态工程实施数量多能够强化生态系统恢复力。

由于全球气候变暖,极端天气频发,气候变率(主要是降水变率和温度变率)成为影响生态系统恢复力的 重要因素^[32,45]。全球(超过 75%的陆地面积)降水变率已经增长^[48],对天气和气候预测以及社会和生态系统 的恢复力和适应力提出了新的挑战^[49]。然而对于陆地生态系统恢复力的归因研究中,忽略了降水变率和温 度变率的重要地位将不利于支持对恢复力影响因素的解析及应对。虽然降水变率的增加有助于观察植被生 长^[50],但年际降水变率更明显的地区植被恢复力较低^[49],这表明植被绿化并不一定对应恢复力的增加^[12]。 本研究采用偏相关系数探究气候变率和恢复力的相关性时,也发现大部分生态工程区的恢复力与气候变率的 正负相关性占比是基本持平的,应证了恢复力对气候变率的非单一响应^[33,51-52]。

由于工程实施是渐进的,每个工程在同一时间点的实施强度也各异,因此目前的证据尚不足以证明全国 大范围出现的恢复力下降是人为因素导致的。Yao等人^[44]也发现了全球生态系统恢复力在 2000 年以后下 降,证明这是全球性问题,全球变化如 CO₂施肥效应^[33]等可能扮演重要作用。而生态修复对恢复力的贡献, 除了工程本身,也会受到气候变化的影响^[36,45,47],有些地方发现是工程主导贡献^[36],但大尺度上可能无法观 测到工程的实施效果,从而得出生态系统绿度增加但恢复力降低的现象^[12]。尽管恢复力下降不一定是人为 因素所致,但这种普遍的恢复力下降情况是值得引起注意的^[53]。考虑到生态保护与修复研究往往缺少大尺 度的生态系统稳定性评价指标方法,因此有必要更加关注生态工程区的生态系统恢复力评价体系探讨^[1,12]。

生态系统恢复力变化是气候变化主导,这在许多研究中达到了共识^[45-46]。本研究着重考虑气候变化对 生态系统恢复力的影响,缺少对人类活动影响的考量。在空间分布上,气候变化和人类活动确实是主导因素, 有必要采用因果分析方法分析工程区实施前后受生态修复政策的影响程度。通过因果推断法可以在控制时



图 4 重叠生态工程区的平均 kNDVI 和 AR(1)及其变化趋势 Fig.4 Trends in ecosystem greenness kNDVI and resilience AR(1) in overlapping ecological project areas in China

间和空间上的异质性因素后,更清晰地评估生态修复政策对不同区域恢复力的真实影响。结合因果分析结果,还可以进一步区分政策影响的直接效应(如植被恢复和水资源保护)与间接效应(如气候调节和土壤改善善),以全面揭示工程区在多重压力下的生态恢复效果。除此之外,由于采用了空间平均的方法,忽略了区域差异性,并且恢复力受到气候背景的影响^[47],存在较大的内部分异性。因此,有必要在控制自然背景条件(如 气候变化)分析人类强度对工程区恢复力的影响,反之亦然。

在国家重大生态系统保护和修复重大工程的格局建设中,亟需对生态修复工程的成效进行科学、可靠、全面的评估^[1]。而恢复力指标可以识别生态系统的稳定状态,将恢复力指标纳入生态修复工程评价中可以实现更全面的生态系统管理^[12]。在生态修复实践中,明确绿度与恢复力之间的联系至关重要,有助于加强和优化决策过程,确保生态修复工作更加精准和高效^[9]。实施基于恢复力开展适应性的管理策略,能够有效地巩

9

固生态保护和修复的成效,同时强化生态系统的稳定性和可持续性^[54]。因此,本研究建议加强在生态保护与修复工程评估中关注指示生态系统稳定性的恢复力指标,从而完善生态修复工程成效的评估体系。

3.2 结论

生态系统恢复力是评估生态工程成效的重要指标,恢复力是表征生态系统稳定性的重要指标。本研究选取中国九大重大生态工程区为研究区,分别运用 kNDVI 和滞后一期的自回归模型系数 AR(1)评估生态系统 绿度和恢复力的空间分布特征和演化趋势,解析了恢复力影响因素的区域差异,结果如下:

(1)中国九大重大生态工程区具有高绿度-低恢复力和低绿度-高恢复力的模式,也就是越绿的工程区具 备更高的恢复力。其中,三江源生态保护和设工程、京津风沙源综合治理工程表现为低 kNDVI、高 AR(1),珠 江流域防护林体系建设工程、退牧还草工程、西南岩溶石漠化综合治理工程表现为高 kNDVI、低 AR(1)。

(2)中国九大重大生态工程区生态系统绿度 kNDVI 呈现总体上升的趋势,而 AR(1)呈现出不同的波动 趋势,但在 2015 年附近达到了历史新高。各个生态工程区的恢复力在断点前后的表现出前升后降、前降后 降、前升后升三种模式。

(3)各影响因素的偏相关显著像元比值均较高,大部分生态工程区的生态系统恢复力对影响因素的响应 是非单一性的,正负相关占比基本持平。平均降水与 AR(1)的相关性主要是负向的,也就是降水富集区的恢 复力较强。土壤湿度与 AR(1)的偏相关显著比例最高。

参考文献(References):

- [1] Fu B J, Liu Y X, Meadows M E. Ecological restoration for sustainable development in China. National Science Review, 2023, 10(7): nwad033.
- [2] 国家林业和草原局. 2021 中国林草资源及生态状况. 北京:中国林业出版社, 2022.
- [3] Chen C, Park T, Wang X H, Piao S L, Xu B D, Chaturvedi R K, Fuchs R, Brovkin V, Ciais P, Fensholt R, Tømmervik H, Bala G, Zhu Z C, Nemani R R, Myneni R B. China and India lead in greening of the world through land-use management. Nature Sustainability, 2019, 2: 122-129.
- [4] Li C J, Fu B J, Wang S, Stringer L C, Wang Y P, Li Z D, Liu Y X, Zhou W X. Drivers and impacts of changes in China's drylands. Nature Reviews Earth & Environment, 2021, 2(12): 858-873.
- [5] 彭建, 吕丹娜, 董建权, 刘焱序, 刘前媛, 李冰. 过程耦合与空间集成: 国土空间生态修复的景观生态学认知. 自然资源学报, 2020, 35 (1): 3-13.
- [6] 彭建, 吕丹娜, 张甜, 刘前媛, 林坚. 山水林田湖草生态保护修复的系统性认知. 生态学报, 2019, 39(23): 8755-8762.
- [7] Liu Y X, Fu B J, Wang S, Rhodes J R, Li Y, Zhao W W, Li C J, Zhou S, Wang C X. Global assessment of nature's contributions to people. Science Bulletin, 2023, 68(4): 424-435.
- [8] Peng J, Xu D M, Xu Z H, Tang H, Jiang H, Dong J Q, Liu Y X. Ten key issues for ecological restoration of territorial space. National Science Review, 2024, 11(7): nwae176.
- [9] 刘焱序,傅伯杰,王帅,赵文武,李琰.空间恢复力理论支持下的人地系统动态研究进展.地理学报,2020,75(5):891-903.
- [10] Wang C X, Liu Y X, Liu X, Qiao W G, Zhao M Y. Valuing ecological restoration benefits cannot fully support landscape sustainability: a case study in Inner Mongolia, China. Landscape Ecology, 2023, 38(12): 3289-3306.
- [11] Pearson D. Landscape ecology 40 years since allerton park: looking back and to the future!. Landscape Ecology, 2024, 39(3): 46.
- [12] Wang Z Z, Fu B J, Wu X T, Li Y J, Feng Y H, Wang S, Wei F L, Zhang L W. Vegetation resilience does not increase consistently with greening in China's Loess Plateau. Communications Earth & Environment, 2023, 4: 336.
- [13] Mayar K, Carmichael D G, Shen X S. Stability and resilience—a systematic approach. Buildings, 2022, 12(8): 1242.
- [14] Holling C S. Resilience and stability of ecological systems. Annual Review of Ecology and Systematics, 1973, 4: 1-23.
- [15] Masik G. The concept of resilience: Dimensions, properties of resilient systems and spatial scales of resilience. Geographia Polonica, 2023, 95 (4): 295-310.
- [16] Pimm S L. The complexity and stability of ecosystems. Nature, 1984, 307(5949): 321-326.
- [17] Dytham C, Pimm S L. The balance of nature? ecological issues in the conservation of species and communities. The Journal of Animal Ecology, 1993, 62(3): 597.
- [18] Grafton R Q, Doyen L, Béné C, Borgomeo E, Brooks K, Chu L, Cumming G S, Dixon J, Dovers S, Garrick D, Helfgott A, Jiang Q, Katic P, Kompas T, Little L R, Matthews N, Ringler C, Squires D, Steinshamn S I, Villasante S, Wheeler S, Williams J, Wyrwoll P R. Realizing resilience for decision-making. Nature Sustainability, 2019, 2: 907-913.

| [19] | Spears B M, Ives S C, Angeler D G, Allen C R, Birk S, Carvalho L, Cavers S, Daunt F, Morton R D, Pocock M J O, Rhodes G, Thackeray S J. |
|------|---|
| | FORUM: Effective management of ecological resilience-are we there yet? Journal of Applied Ecology, 2015, 52(5): 1311-1315. |

- [20] Súnchez-Pinillos M, Dakos V, Kéfi S. Ecological dynamic regimes: a key concept for assessing ecological resilience. Biological Conservation, 2024, 289; 110409.
- [21] Dakos V, van Nes E H, D'Odorico P, Scheffer M. Robustness of variance and autocorrelation as indicators of critical slowing down. Ecology, 2012, 93(2): 264-271.
- [22] Benson V, Donges J F, Boers N, Morr A, Staal A, Vollmer J, Wunderling N. Measuring tropical rainforest resilience under non-Gaussian disturbances. Environmental Research Letters, 2024, 19(2): 024029.
- [23] Contosta A R, Battles J J, Driscoll C T, Garlick S R, Holmes R T, Likens G E, Rodenhouse N L, Rogers S H, Templer P H, Vadeboncoeur M A, Groffman P M. Early warning signals of changing resilience in the biogeochemistry and biology of a northern hardwood forest. Environmental Research Letters, 2023, 18(9): 094052.
- [24] Feng Y H, Su H J, Tang Z Y, Wang S P, Zhao X, Zhang H, Ji C J, Zhu J L, Xie P, Fang J Y. Reduced resilience of terrestrial ecosystems locally is not reflected on a global scale. Communications Earth & Environment, 2021, 2: 88.
- [25] van de Leemput I A, Dakos V, Scheffer M, van Nes E H. Slow recovery from local disturbances as an indicator for loss of ecosystem resilience. Ecosystems, 2018, 21(1): 141-152.
- [26] Arani B M S, Carpenter S R, Lahti L, van Nes E H, Scheffer M. Exit time as a measure of ecological resilience. Science, 2021, 372(6547): eaay4895.
- [27] Karim M R, Mukul S A, Zahir R B, Saimun S R, Arfin-Khan M A S. The role of protected areas co-management in enhancing resistance and resilience of deciduous forest ecosystem to extreme climatic events in Bangladesh. Journal of Environmental Management, 2023, 326: 116800.
- [28] Vogel A, Scherer-Lorenzen M, Weigelt A. Grassland resistance and resilience after drought depends on management intensity and species richness. PLoS One, 2012, 7(5): e36992.
- [29] Flores B M, Holmgren M, Xu C, van Nes E H, Jakovac C C, Mesquita R C G, Scheffer M. Floodplains as an Achilles' heel of Amazonian forest resilience. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2017, 114(17): 4442-4446.
- [30] Fu A H, Li W H, Chen Y N, Wang Y, Hao H C, Li Y P, Sun F, Zhou H H, Zhu C G, Hao X M. The effects of ecological rehabilitation projects on the resilience of an extremely drought-prone desert riparian forest ecosystem in the Tarim River Basin, Xinjiang, China. Scientific Reports, 2021, 11(1): 18485.
- [31] Gazol A, Camarero J J, Anderegg W R L, Vicente-Serrano S M. Impacts of droughts on the growth resilience of Northern Hemisphere forests. Global Ecology and Biogeography, 2017, 26(2): 166-176.
- [32] Stuart-Haëntjens E, De Boeck H J, Lemoine N P, Mänd P, Kröel-Dulay G, Schmidt I K, Jentsch A, Stampfli A, Anderegg W R L, Bahn M, Kreyling J, Wohlgemuth T, Lloret F, Classen A T, Gough C M, Smith M D. Mean annual precipitation predicts primary production resistance and resilience to extreme drought. Science of the Total Environment, 2018, 636: 360-366.
- [33] 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.
- [34] Isbell F, Craven D, Connolly J, Loreau M, Schmid B, Beierkuhnlein C, Bezemer T M, Bonin C, Bruelheide H, de Luca E, Ebeling A, Griffin J N, Guo Q F, Hautier Y, Hector A, Jentsch A, Kreyling J, Lanta V, Manning P, Meyer S T, Mori A S, Naeem S, Niklaus P A, Polley H W, Reich P B, Roscher C, Seabloom E W, Smith M D, Thakur M P, Tilman D, Tracy B F, van der Putten W H, van Ruijven J, Weigelt A, Weisser W W, Wilsey B, Eisenhauer N. Biodiversity increases the resistance of ecosystem productivity to climate extremes. Nature, 2015, 526: 574-577.
- [35] Lawrence D, Radel C, Tully K, Schmook B, Schneider L. Untangling a decline in tropical forest resilience: constraints on the sustainability of shifting cultivation across the globe. Biotropica, 2010, 42(1): 21-30.
- [36] 邵全琴, 刘树超, 宁佳, 刘国波, 杨帆, 张雄一, 牛丽楠, 黄海波, 樊江文, 刘纪远. 2000—2019 年中国重大生态工程生态效益遥感评估. 地理学报, 2022, 77(9): 2133-2153.
- [37] Pinzon J E, Pak E W, Tucker C J, Bhatt U S, Frost G V, Macander M J. Global Vegetation Greenness (NDVI) from AVHRR GIMMS-3G+, 1981-2022. NASA-funded ORNL Distributed Active Archive Center (ORNL DAAC), Oak Ridge, Tennessee, USA, 2023[2024-08-01].
- [38] Zhang X, Liu L Y, Chen X D, Gao Y, Xie S, Mi J. GLC_FCS30: global land-cover product with fine classification system at 30? m using timeseries Landsat imagery. Earth System Science Data, 2021, 13(6): 2753-2776.
- [39] Zhang K, Chen H L, Ma N, Shang S S, Wang Y Q, Xu Q L, Zhu G F. A global dataset of terrestrial evapotranspiration and soil moisture dynamics from 1982 to 2020. Scientific Data, 2024
- [40] Wang Y J, Liu Y X, Chen P, Song J X, Fu B J. Interannual precipitation variability dominates the growth of alpine grassland above-ground biomass

- [41] Zeng Y L, Hao D L, Huete A, Dechant B, Berry J, Chen J M, Joiner J, Frankenberg C, Bond-Lamberty B, Ryu Y, Xiao J F, Asrar G R, Chen M. Optical vegetation indices for monitoring terrestrial ecosystems globally. Nature Reviews Earth & Environment, 2022, 3: 477-493.
- [42] Camps-Valls G, Campos-Taberner M, Moreno-Martínez Á, Walther S, Duveiller G, Cescatti A, Mahecha M D, Muñoz-Marí J, García-Haro F J, Guanter L, Jung M, Gamon J A, Reichstein M, Running S W. A unified vegetation index for quantifying the terrestrial biosphere. Science Advances, 2021, 7(9): eabc7447.
- [43] Boulton C A, Lenton T M, Boers N. Pronounced loss of Amazon rainforest resilience since the early 2000s. Nature Climate Change, 2022, 12: 271-278.
- [44] Yao Y, Liu Y X, Fu F Y, Song J X, Wang Y J, Han Y, Wu T J, Fu B J. Declined terrestrial ecosystem resilience. Global Change Biology, 2024, 30(4): e17291.
- [45] Forzieri G, Dakos V, McDowell N G, Ramdane A, Cescatti A. Emerging signals of declining forest resilience under climate change. Nature, 2022, 608(7923): 534-539.
- [46] Wang H, Ciais P, Sitch S, Green J K, Tao S L, Fu Z, Albergel C, Bastos A, Wang M J, Fawcett D, Frappart F, Li X J, Liu X Z, Li S C, Wigneron J P. Anthropogenic disturbance exacerbates resilience loss in the Amazon rainforests. Global Change Biology, 2024, 30(1): e17006.
- [47] Yao Y, Liu Y X, Zhou S, Song J X, Fu B J. Soil moisture determines the recovery time of ecosystems from drought. Global Change Biology, 2023, 29(13): 3562-3574.
- [48] Zhang W X, Zhou T J, Wu P L. Anthropogenic amplification of precipitation variability over the past century. Science, 2024, 385 (6707): 427-432.
- [49] Smith T, Boers N. Global vegetation resilience linked to water availability and variability. Nature Communications, 2023, 14(1): 498.
- [50] Piao S L, Wang X H, Park T, Chen C, Lian X, He Y, Bjerke J W, Chen A P, Ciais P, Tømmervik H, Nemani R R, Myneni R B. Characteristics, drivers and feedbacks of global greening. Nature Reviews Earth & Environment, 2020, 1: 14-27.
- [51] 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: 1028-1031.
- [52] Wu J H, Liang S L. Assessing terrestrial ecosystem resilience using satellite leaf area index. Remote Sensing, 2020, 12(4): 595.
- [53] Hu Y, Wei F L, Fu B J, Wang S, Zhang W M, Zhang Y L. Changes and influencing factors of ecosystem resilience in China. Environmental Research Letters, 2023, 18(9): 094012.
- [54] 王军,傅伯杰,张骁,刘焱序,赵文武.基于自然的青藏高原一体化生态保护修复优化管理.中国科学院院刊,2024,39(7):1123-1130.