周 连,贾 夏,赵永华,等.黄土高原植被光合动态的时空演变及驱动机制—基于参数最优地理探测器模型 [J]. 中国环境科学, 2026,46(1):365-378.
Zhou L, Jia X, Zhao Y H, et al. Spatiotemporal Evolution and Driving Mechanisms of Vegetation Photosynthesis Dynamics in the Loess Plateau Based on Optimal Parameter-Based Geographical Detector [J]. China Environmental Science, 2026,46(1):365-378.

黄土高原植被光合动态的时空演变及驱动机制
——基于参数最优地理探测器模型

周 连[1,2,3],贾 夏[2,3,4],赵永华[1,2,3*],张 鹏[1,2,3],赵 明[1,2,3],司绍诚[1,2,3] (1.长安大学土地工程学院,陕西 西安 710054；2.陕西省土地整治重点实验室,陕西 西安 710054；3.自然资源部退化及未利用土地整治工程重点实验室,陕西 西安 710054；4.长安大学水利与环境学院,陕西 西安 710054)

摘要：基于 GOSIF 数据集与参数最优地理探测器模型(OPGD),系统分析了 2002~2022 年黄土高原及其 6 个生态分区植被光合动态的时空演变特征及驱动机制.结果表明:(1)在时间尺度上,全域年均 SIF 呈显著波动上升趋势,丘陵沟壑区 B2 副区增速最高[0.0024W/(m²·μm·sr·a)],沙地和农灌区增速最低[0.0006W/(m²·μm·sr·a)].(2)在空间尺度上,呈现西部-东南高、西北低的分布格局,高塬沟壑区青海省中部、关中平原等局部区域显著退化,11.36%区域(土石山及河谷平原区南部等)SIF 变化与整体趋势相悖.(3)人类活动与气候变化对植被光合演化具有双重效应,前者为主导因子,后者驱动空间分异;降水主导高塬沟壑区 A1 副区变化,太阳辐射主导高塬沟壑区 A2 副区、丘陵沟壑区及土石山及河谷平原区演变,因子交互作用协同增强 SIF 空间分异.

关键词：GOSIF；参数最优地理探测器模型；黄土高原；生态分区；植被光合动态
中图分类号：X171.1 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2026)01-0365-14

Spatiotemporal evolution and driving mechanisms of vegetation photosynthesis dynamics in the Loess Plateau based on optimal parameter-based geographical detector. ZHOU Lian[1,2,3], JIA Xia[2,3,4], ZHAO Yong-hua[1,2,3*], ZHANG Peng[1,2,3], ZHAO Ming[1,2,3], SI Shao-cheng[1,2,3] (1.School of Land Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China；2.Key Laboratory of Land Consolidation of Shaanxi Province, Xi'an 710054, China；3.Key Laboratory of Degradation and Unused Land Remediation Engineering of the Ministry of Natural Resources, Xi'an 710054, China；4.School of Water and Environment, Chang'an University, Xi'an 710054, China;). *China Environmental Science*, 2026,46(1)：365~378

Abstract：Based on the Global dataset of solar-induced chlorophyll fluorescence (GOSIF) and the Optimal Parameters-based Geographical Detector (OPGD) model, systematically analyzed the spatio-temporal patterns and driving mechanisms of vegetation photosynthesis on the Loess Plateau (LP) and its six ecological subregions from 2002 to 2022. The results indicated that: (1) On the temporal scale, the annual mean SIF across the LP region demonstrated significant growth with spatial heterogeneity. The hilly-gully region (Subregion B2) showed the highest increase rate[0.0024W/(m²·μm·sr·a)], while sandy and irrigated agricultural areas displayed the lowest [0.0006W/(m²·μm·sr·a)]. (2) On the spatial scale, the spatial distribution of annual SIF on the LP was significantly different, Notable degradation was observed in localized areas, particularly within the high-plain-gully Subregion A1 (central Qinghai Province) and the Guanzhong Plain. 11.36% of the region (southern rocky mountain and valley plain areas) exhibited SIF changes that deviated from the regional trend. (3) Anthropogenic factors dominated human activities and climate change exerted dual influences on vegetation photosynthetic evolution, with the former acting as the dominant driver and the latter governing spatial divergence. Precipitation primarily regulated SIF variations in the high-plain-gully Subregion A1, while solar radiation dominated the evolution in Subregion A2, hilly-gully regions, and rocky mountain-valley plain areas. Factor interactions synergistically amplified SIF spatial heterogeneity.

Key words：global dataset of solar-induced chlorophyll fluorescence (GOSIF)；optimal parameters-based geographical detector；Loess Plateau；ecological regionalization；vegetation photosynthetic dynamics

IPCC 第六次评估报告(AR6)警示,尽管过去 50 年全球陆地生态系统吸收了约 30%的人为碳排放,但其碳汇功能正面临着气候变化和土地利用变化的双重冲击[1-2].植被覆盖是生态修复成效的直接反馈,然而碳汇效率才是衡量生态本底质量的核心标尺.单纯的监测需构建覆盖特征与碳汇效率的关联

收稿日期：2025-05-22
基金项目：国家自然科学基金联合重点项目(U23A2061)；陕西省科技创新团队(2024RS-CXTD-55);长安大学中央高校基本科研业务费专项资金(300102355401)
* 责任作者，教授, yonghuaz@chd.edu.cn

机制,破解“见绿不见碳”困局,推动生态修复从形态改善向功能提升转变.

植被通过光合作用驱动碳同化过程以调控陆地碳汇强度,且其光能利用效率的时空异质性影响碳循环与气候系统的反馈[3-5].归一化植被指数(NDVI)通过红光与近红外波段的反演构建了成熟的监测体系,实现了对打空间尺度植被“绿度”的精细化与持续性监测[6],但这类指数仅能通过波段之间的计算反映叶绿素的消耗量,间接探测植物“潜在光合作用”[6,8-9].其本质捕获的是植被动态的变化,虽然能有效描述植被的外部结构特征(冠层绿度、生物量),却对环境胁迫下植被生理功能的动态变化敏感性不足[10-11],导致植被结构与功能趋势常存在解耦现象[12-13].植物在太阳光照条件下通过叶绿素光合中心发射出的日光诱导叶绿素荧光(SIF)与植被总初级生产力(GPP)有很强的相关性[14],具有红光(690nm 左右)和近红外(740nm 左右)两个波峰[15-16],它是伴随植被光合作用产生的信号,包含植被生理、生化和代谢等特性的信息,是实际光合作用的“光学探针”[17].具有独立估计光合作用的巨大潜力[18].相较基于反射率的植被指数,SIF 与光合作用的机理联系构建了区域植被生理监测的新范式[19-20],通过融合 OCO-2 卫星观测数据与多源遥感数据,构建的 GOSIF 数据集突破了传统 SIF 产品千米级空间分辨率与月尺度时间分辨率的限制,显著提升了 SIF 在生态监测中的应用潜力[15].

影响植物光合效率主要受三大生理限制因素制约:生化限制、气孔限制和叶肉限制[21-22],这些限制因素可动态响应温度、光照、水分和 CO_2 浓度等环境因子的变化,对光合过程产生适应性调控作用[23].温度、降水和光照通过调控植被生长周期与碳同化速率主导生产力格局,而极端气候事件可引发气孔关闭与光抑制等连锁反应.CO_2 浓度升高虽增强碳同化潜力,但受限于养分供应与气孔适应性调节的互馈机制[21].此外,人类活动对自然环境的作用具有双向性[24-25],如通过改变土地覆盖类型,间接影响气候和土壤条件,进而影响植被.针对上述多因子非线性交互的复杂机制,现有研究亟需解耦这些变量的直接效应与空间传导的间接效应.地理探测器虽能够较好地分析单个因子和因子交互的驱动作用[26],但其空间数据离散化方法与尺度效应常导致解释偏差[27],引入最优参数地理探测器(OPGD)能较好解决以上问题[28],其最优参数被探索为空间数据离散化方法、空间层数和空间尺度参数的最佳组合,显著提升了地理特征提取与空间异质性解析的精度,为揭示多尺度环境胁迫对光合作用的级联效应提供了方法学突破[29].

黄土高原是我国“三区四带”生态屏障的重要组成部分,在生态安全保障方面具有重要作用,同时是典型生态脆弱区[30],长期面临水土资源约束趋紧、植被恢复可持续性存疑、生态功能提升滞后等多重挑战.退耕还林等工程显著改善黄土高原区域植被覆盖和生态环境[31-33],但“绿色覆盖”向“绿色功能”的转化机制仍不明确,生态工程的实际碳汇增益难以精准量化,且大规模造林可能引发土壤干层加深、生物多样性单一化等次生风险[34-36].依赖传统植被指数,难以精准量化黄土高原植被光合作用的动态变化规律,亦无法区分气候变化与人类活动的动态博弈效应.因此,基于 GOSIF 的植被光合动态变化研究,不仅是解析“绿化”向“碳汇”转化的科学钥匙,更是识别生态恢复提质增效关键路径的迫切需求.利用 2002~2022 年黄土高原 GOSIF 数据,识别气候与人类活动多重因素最优离散化参数,系统揭示植被光合作用的时空演变规律及其驱动机制,为区域生态环境修复与质量提升提供决策支持.

1 研究地区与数据来源

1.1 研究区概况

黄土高原位于我国半湿润区向干旱地区过渡地带[37],跨越陕、甘、宁、青、豫、蒙、晋七个省区,是我国的重要生态区[38].该区域地势西南高、东南低,面积约 63.5 万 km^2,地貌以塬、梁、峁、沟壑为主体,构成全球规模最大、侵蚀最强烈的黄土沉积地貌区.受大陆性季风气候控制,研究区水热条件呈显著经向分异,造成植被类型的梯度地带性,东南部以森林草原为主,向西北逐渐演替为典型草原及半干旱草原[39],根据国家发展和改革委员会分区原则和方法,针对黄土高原水土流失治理技术和生态恢复模式的区域性差异,将黄土高原四个一级生态区:黄土高塬沟壑区(A)、黄土丘陵沟壑区(B)、沙地和农灌区(C)、土石山区及河谷平原区(D),其中黄土高塬沟壑区以六盘山为界,分为 A1 和 A2 两个副区;B 区以毛

乌素沙漠南缘为界,分为 B1 和 B2 两个副区(图 1)[40].

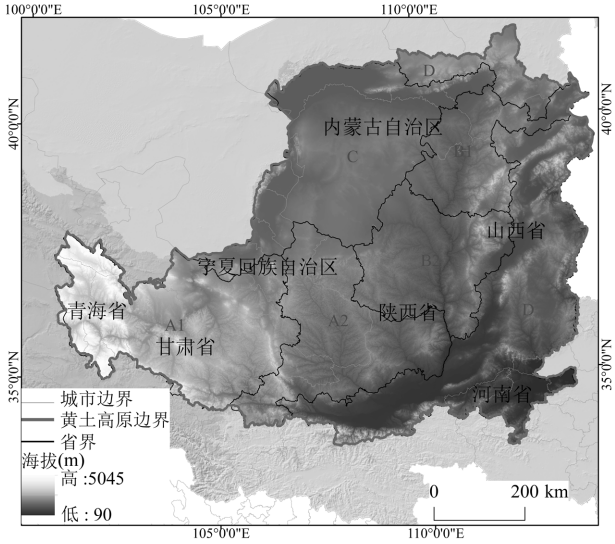


图 1　研究区位置

Fig.1　The geographical location of study area

1.2　数据来源

GOSIF 是基于美国航天局(NASA)于 2014 年发射的碳轨道观测卫星(OCO-2)反演的离散 SIF 数据[15],通过机器学习方法集成 MODIS 数据和 MERRA-2 气象数据而生成,具有高时空分辨率(0.05°,8d).研究使用 2002~2022 年的 GOSIF 年尺度数据.

气温和降水数据来源于国家地球系统科学数据中心—黄土高原分中心(https://loess.geodata.cn/),时间分辨率为月尺度,根据月数据分别求取年平均气温(TEMP)数据和年降水量(P)数据;高程数据来源于地理空间数据云(https://www.gscloud.cn/);年太阳总辐射(SR)数据来自 ECMWF 的 ERA5—Land 月尺度数据产品(https://cds.climate.copernicus.eu/),空间分辨率 0.1°.使用 Google Earth Engine(https://code.earthengine.google.com/)合成年度气象数据[41].人类活动强度(HA)使用综合人类多方面压力(建筑环境、人口密度、夜间灯光等)开发的全球陆地人类足迹年度数据集[42].

以上数据均被重采样至 1km 分辨率,投影为 WGS_1984_UTM_Zone_48_N.

2　研究方法

2.1　SIF 变化趋势的显著性分析

Theil-Sen Median 方法(Sen 斜率估计)是一种稳健的非参数统计的趋势计算方法,该方法计算效率高,对于测量误差和利群数据不敏感,适用于长时间序列数据的趋势分析.计算公式如下:

$$\beta = \mathrm{Median}\left(\frac{x_j - x_i}{j - i}\right);\ \forall j > i \qquad (1)$$

式中:β为 Sen 趋势度,x_j 和 x_i 表示第 j 个和第 i 个时间的样本序列值,Median 为取中值函数.当β>0 时反映上升趋势,反之则反映下降趋势.

Mann-Kendall 趋势检验是一种非参数的时间序列趋势性检验方法,不需要测量值服从正态分布,不受缺失值和异常值的影响,适用于长时间序列数据的趋势显著检验.计算公式如下:

$$S = \sum_{i=1}^{(n-1)} \sum_{j=i+1}^{n} \mathrm{sgn}(x_j - x_i); i < j \leqslant n \qquad (2)$$

式中:S 表示检验的统计量,n 表示时间序列的样本量,x_j 和 x_i 表示在 j 时刻和 i 时刻的数据值.

显著性水平 a=0.05,趋势分级见表 1.

表 1　黄土高原 SIF 变化趋势分级

Table 1　Classification of SIF variation trends in the Loess Plateau

β	Z	趋势类别	趋势分类
$\beta \geqslant 0.5\%$	Z >1.96	1	显著改善
	−1.96< Z <1.96	2	轻微改善
−0.5%<β<0.5%	Z	3	相对稳定
$\beta \leqslant -0.5\%$	−1.96< Z <1.96	4	轻微退化
	Z <−1.96	5	显著退化

将 Sen 趋势度和 Mann-Kendall 趋势检验结合构建的 Sen+Mann-Kendall 趋势分析,是判断长时序数据趋势的重要方法[43].通过 Sen 趋势度分析,得到长时间序列主体的趋势变化,用 Mann-Kendall 显著性检验 Sen 趋势度的显著性,两种方法结合可有效减少测量误差和离群数据对统计结果的影响[44-46].

2.2　多元回归残差分析法

建立年均气温、年降水量和年太阳总辐射与 SIF 的回归方程,SIF 的观测值 SIF_{obs} 与 SIF_{CC} 之间的差值即为残差,以区分气候变化和人类活动导致的 SIF 变化.当残差可以忽略不计时,可以用气候要素来解释 SIF 的变化;当残差变化很大时,SIF 的变化则是由人类活动引起的.SIF 残差的上升趋势表明人类活动改善了植被光合活动,下降趋势表明了人类活动导致了植被光合活动的减弱[47-48].

$$SIF_{CC} = a \times TEMP + b \times P + c \times SR + \theta \quad (3)$$

$$SIF_{HA} = SIF_{obs} - SIF_{cc} \quad (4)$$

式中:SIF_{CC}为预测 SIF,SIF_{HA}表示人类活动对 SIF 的影响,SIF_{obs}为 SIF 的观测值;TEMP、P 和 SR 分别为年平均气温(℃)、年降水量(mm)和年太阳辐射(MJ/m^2);a、b 和 c 分别表示自变量的回归系数,θ表示随机误差.根据表 2 对 SIF 变化的主要驱动因素进行区分,计算气候变化和人类活动对 SIF 变化的贡献率.

2.3 相对发展率

相对发展率(NICH)是测度研究区内,不同像元在某一时期内的变化与同一时期研究区整体变化的关系[49].

$$NICH = \left(\frac{Y_{2i} - Y_{1i}}{Y_2 - Y_1} \right) \quad (5)$$

式中:Y_{2i}和 Y_{1i}分别代表第 i 个像元在时间 2 和时间 1 的值;Y_2 和 Y_1 分别代表研究区在时间 2 和时间 1 的像元平均值[50].

2.4 参数最优地理探测器(OPGD)

为系统识别黄土高原 SIF 的空间驱动机制,采用参数最优地理探测器模型通过数据驱动的空间尺度优选与自适应离散化策略,克服传统模型因主观划分离散化区间与固定空间单元导致的解释偏差[26,51].

2.4.1 因子探测器 因子探测器作为地理探测器的核心部分,可以确定潜在驱动因子多大程度上解释了因变量的空间分异,一般用 q 值来表示, q 值的计算方法如下:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^{l} N_h \sigma_h^2}{\sigma^2 N} = 1 - \frac{SSW}{SST} \quad (6)$$

式中:q 为各因子对 SIF 的解释力,q 值的范围为[0,1],当 q 值越大,因子对 SIF 的解释力越强;h 为 SIF 和影响因子的分层;N_h 和 N 分别是第 h 层和整个区域的单位数. σ_h^2 和 σ^2 是第 h 层和整个区域的方差;SSW 和 SST 分别表示层内方差之和与整个区域总方差.在极端情况下,q 值为 1 表示因子 X 完全控制了 Y 的空间分布,q 值为 0 表示因子 X 对 Y 没有影响.

2.4.2 参数优化 参数优化包括变量离散化参数优化和空间尺度优化[52].对每个驱动因子进行自然断点、相等间断、几何间断、分位数及标准差 5 种离散方法进行离散化,分类数目统一为 4~10 类.将因子探测器计算得到的 q 值最高的参数组合(离散化方法与分类数目)作为最优离散化参数.

表 2 SIF 变化的驱动因素判定标准及贡献率计算方法

Table 2 Criteria for determining the driving factors of SIF changes and calculation methods for contribution rate.

范围(PSIF)	驱动因素	驱动因素的划分标准		驱动因素的贡献率%	
		范围(SIF_{CC})	范围(SIF_{HA})	气候变化	人类活动
>0	CC&HA	>0	>0	$\frac{Slope(SIF_{CC})}{Slope(SIF_{obs})}$	$\frac{Slope(SIF_{HA})}{Slope(SIF_{obs})}$
	CC	>0	<0	100	0
	HA	<0	<0	0	100
<0	CC&HA	<0	<0	$\frac{Slope(SIF_{CC})}{Slope(SIF_{obs})}$	$\frac{Slope(SIF_{HA})}{Slope(SIF_{obs})}$
	CC	<0	>0	100	0
	HA	>0	<0	0	100

注:SIF_{obs}为SIF观测值;SIF_{CC}为气候变化对SIF变化影响量;SIF_{HA}为人类活动对SIF变化的影响量;CC为气候变化;HA为人类活动.

空间尺度优化是为减少因尺度不同造成的计算结果差异,根据数据分辨率和研究区的覆盖范围,通过比较在不同空间尺度上所有驱动因素 q 的第 90%分位数,当分位数达到最高值时,即为最优空间尺度[28,52-53].

2.4.3 交互探测器 交互探测器通过比较两个单一因子在单独作用和共同作用时的 q 值,来判断它们之间的交互作用特点,该方法对于相互作用的假设不仅限于传统统计学方法,因此具有一定的优势.交互作用类型如表 3[54].

表 3 两个驱动因子对因变量交互作用的类型

Table 3 Types of interaction between two driving factors and the dependent variable

判断依据	交互作用类型
$q(X_1 \cap X_2) < \text{Min}[q(X_1), q(X_2)]$	非线性减弱
$\text{Min}[q(X_1), q(X_2)] < q(X_1 \cap X_2) < \text{Max}[q(X_1), q(X_2)]$	单因子非线性减弱
$q(X_1 \cap X_2) > \text{Max}[q(X_1), q(X_2)]$	双因子增强
$q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$	独立
$q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$	非线性增强

3 结果与分析

3.1 黄土高原 SIF 时间变化特征

在研究期内,黄土高原年均 SIF 总体上呈现波动上升的增长趋势(图 2),SIF 平均值由 0.0439W/(m^2·μm·sr·a)增长至 0.0752W/(m^2·μm·sr·a),年均增长

率为 0.0016W/(m^2·μm·sr·a).

六个生态分区的 SIF 虽均呈显著增长趋势(P<0.05),但其年际增速表现出显著的空间异质性(图 3).具体而言,B2 副区年变化率最高,达到了[0.0024W/(m^2·μm·sr·a)],其次是 A2 副区[0.0023W/(m^2·μm·sr·a)],C 区年均变化率最小[0.0006W/(m^2·μm·sr·a)],且该区年均值在六个生态分区最低[0.0135W/(m^2·μm·sr·a)](图 4a).整体来看,除 A1 副区和 C 区外,其余分区 SIF 年均增速均超过或等于区域整体水平[0.0016W/(m^2·μm·sr·a)].整个研究期间内全区及各分区保持稳定增长(标准差σ=0.004~0.015),但存在阶段性差异:2002~2010 年为低速稳定期(σ=0.002~0.006),2010 年出现显著突变(P<0.05)后,后期波动性增强(σ=0.003~0.010),这可能与生态恢复政策实施后的效应有关.现有研究表明,在黄土高原地区实施的一系列生态建设与可持续发展工程所带来的生态恢复成效逐渐显现,区域植被覆盖水平得到大幅提升[55],生态环境治理取得积极成效[56],有机碳储量显著提升[57].这些工程的核心机制是人为干预解除生态胁迫,进而激活生态系统的自我修复能力.然而,由于政策实施强度与自然本底的空间异质性,导致恢复效果呈区域分异,制约恢复效率的优化[58].

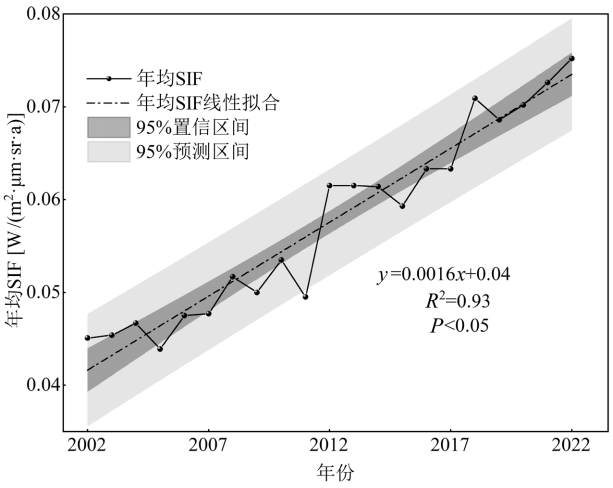


图 2　2002~2022 年 SIF 年际变化

Fig.2　Interannual variation in SIF from 2002 to 2022

3.2　黄土高原 SIF 空间变化特征

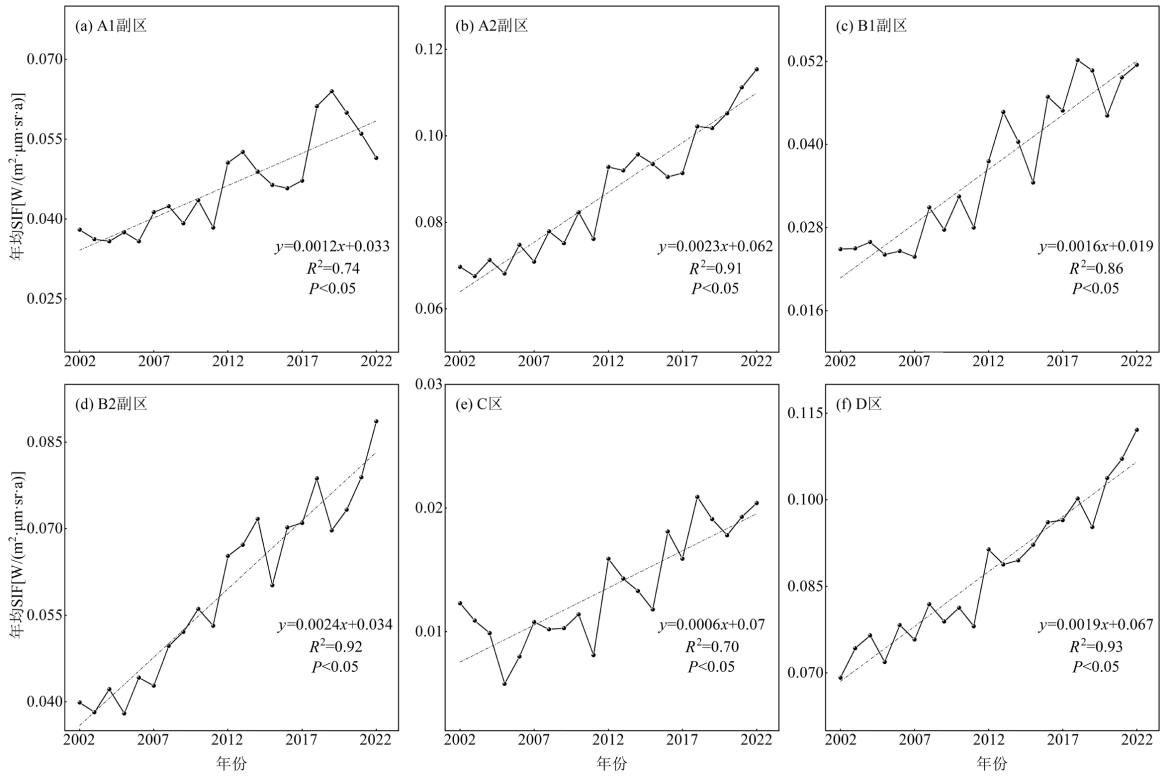


图 3　不同生态分区 SIF 年际变化

Fig.3　Interannual variation of SIF among different ecological regionalization

黄土高原 SIF 整体呈现东南高西北低的空间分布格局(图 4a).其中,低值区面积占比 32.81%,从 C 区

至 A1 区北部成带状分布,其均值(0.014)显著低于其他区域.A2 区西部及 B 区为中低值过渡带(0.027~0.61),包括陕西北部、甘肃中部和宁夏南部等地.A2 副区和 D 区为中高值区,平均值可达 0.1 以上,A2 副区内的子午岭与 D 区南部边缘地带分布有小面积高值区(>0.150).

SIF 相对发展率东高西低(图 4b),负值区占比 11.36%,集中分布于 A1、B1 和 C 区,在 D 区有零星分布,与关中城市群和晋中城市去建成区位置吻合.这些地区植被光合动态变化与区域整体趋势相反,可能与城市化扩张、水资源竞争性利用及历史过度开垦有关.而中南部持续高增长区的集聚现象与退耕还林还草工程密集实施区高度重合,说明了人为干预对植被光合动态具有正向调控作用.

黄土高原 82.48%的区域 SIF 呈现出明显的改善趋势(图 4c),显著改善区域占 76.23%,远大于呈现退化趋势的区域(仅占 0.46%).其中,A2 副区、B 区和 D 区的 SIF 指数变化最为强烈,均表现出显著改善的趋势.而 C 区的大部分区域以及 A1 副区西北部的 SIF 变化则较为平稳,未显著提升.部分地区的 SIF 变化趋势不明显,这可能与该地区干旱、植被生长困难等自然条件有关,也可能受到人类活动和土地利用方式的影响,导致植被光合作用效果不显著.此外,仍有少数区域呈现出显著的退化趋势,占总面积的约 0.2%,主要集中在 A 区青海省中部、D 区关中平原、C 区西部的宁夏平原以及北部的内蒙古自治区,这些地区地势较为平坦,土地资源丰富,且多为大型城市聚集区,人类活动较为强烈.

3.3 植被光合动态变化的归因

3.3.1 多元回归残差分析 基于多元驱动力分析,黄土高原植被光合动态(SIF)的空间分异呈现显著的驱动类型异质性(图 4d).研究结果显示:气候变化与人类活动协同驱动区占总面积的 94.83%,广泛分布于 A 区中部和东部、B 区全境、C 区东南部以及 D 区东部,表明该区域生态系统变化受自然-人为因素共同调控的特征显著.而单一驱动类型区占比相对较小.

纯气候变化驱动改善区(1.32%)集中分布于 C 区中南部,反映该区域生态系统对气候因子的敏感性;纯人类活动驱动改善区(1.42%)主要位于 A2 副区东南部和 D 区南部,与重点生态工程实施区高度吻合.退化区域呈现差异化驱动特征:气候-人类活动协同驱动退化区(0.89%)呈斑块状分布于 C 区北部、西南部及 D 区南部;纯气候变化驱动退化区(0.28%)和纯人类活动驱动退化区(1.24%)主要分布在 A1 副区西南部、C 区北部及 D 区南部,可能与这些区域特殊的地形地貌和土地利用方式有关.

以贡献率深入区分气候变化与人类活动的驱动机制,总体而言,气候因素和人类活动对 SIF 年际变化的贡献率分别为 26.37%和 73.27%(图 5),这说明人类活动对研究区 SIF 变化起到了主导作用,而气候因素则在一定程度上影响了 SIF 的变化.黄土高原约 88.91%的区域受人类活动因素的主导(贡献率≥50%),其中突出贡献区(贡献率≥75%)占区域面积的 48.77%,集中分布于研究区中部和南部.相比之下,受气候因子主导(贡献率≥50%)的区域占比仅为 8.66%(主要分布在 C 区中北部、A1 副区北部等生态脆弱带).在 6 个分区中,人类活动对 SIF 增长的贡献率均在 65%以上,而气候因素的贡献率则介于 15%至 35%之间.人类活动对 A2 副区的贡献最大(80.94%),对 A1 副区的贡献最小(65.33%),气候因素对 SIF 增长的贡献率在 A1 副区最大(33.77%),在 A2 副区则最小(19.05%).

3.3.2 单因子探测 基于参数最优地理探测器(OPGD)的因子贡献率分析表明,各因子均有显著驱动作用(P 值均小于 0.001)且这种作用呈现出了明显的空间分异性(图 6):年降水量(P)对 A 区(q=0.52)、A2 副区(q=0.49)、B1 副区(q=0.47)及 D 区(q=0.51)SIF 空间分异的解释力最强,其高贡献率与半干旱区水分限制效应密切相关;B2 副区以太阳辐射(SR)为主导因子(q=0.55),可能源于该区退耕还林背景下光能利用效率的显著提升;C 区(沙地与农灌区)SIF 分异性主要受人类活动(HA)驱动(q=0.38),反映了干旱区水资源竞争性利用(如地下水超采)对植被光合作用的抑制作用.C 区驱动因子的整体 q 值偏小,因子之间 q 值接近,人类活动首次表现出较高解释力,这表明 C 区 SIF 与其驱动因子关系十分复杂,受多种因子的共同调控,难以明确筛选出驱动 SIF 的代表性因子.综合来看,气象要素是黄土高原及其各生态分区 SIF 空间变化的主要影响因素,地形与人类活动的解释力相对较弱.

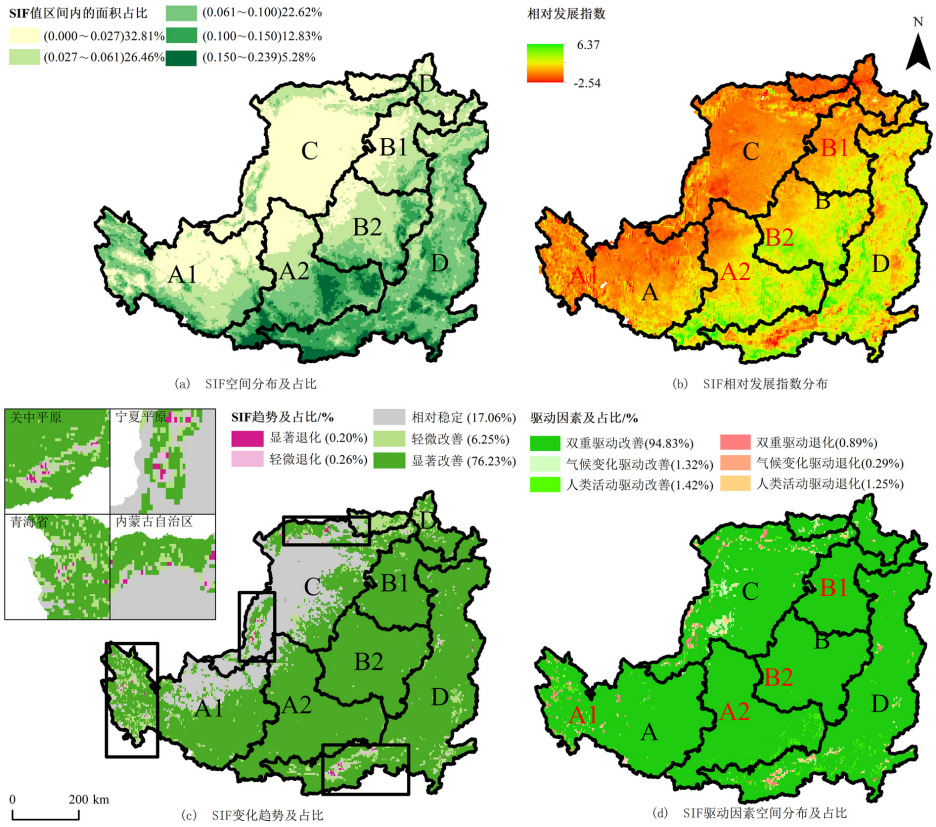


图 4　黄土高原植被光合空间分布、相对发展率及驱动因素

Fig.4　Spatial distribution of vegetation photosynthesis, NICH, and driving factors in the loess plateau

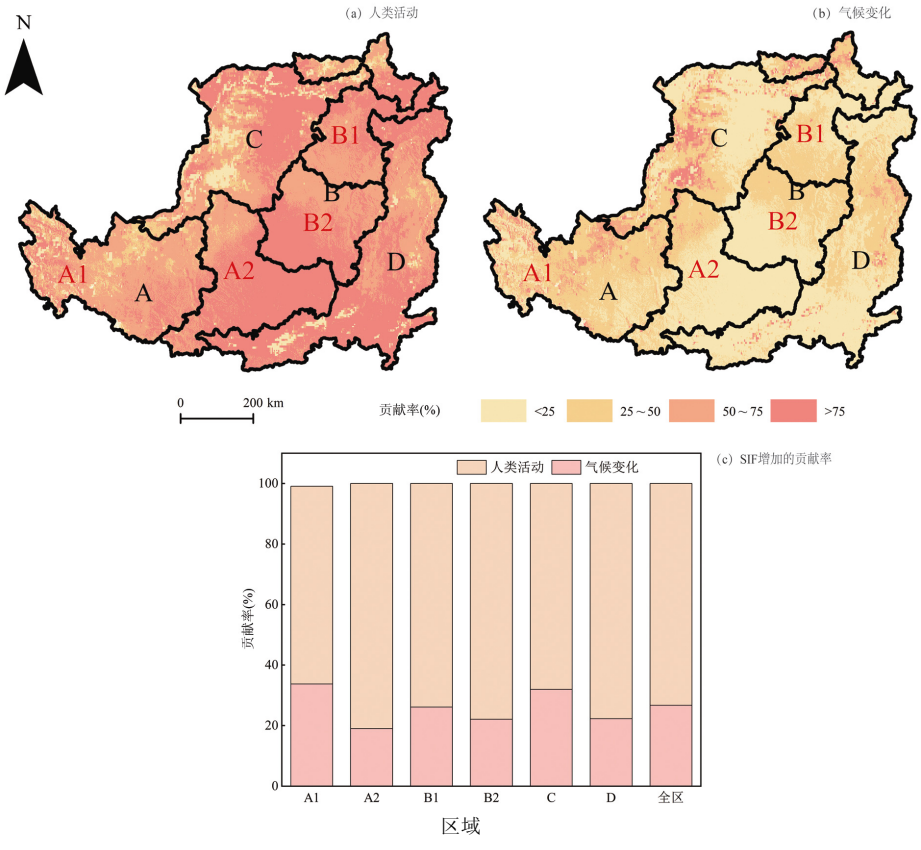


图 5　气候变化和人类活动对黄土高原及其生态分区 SIF 增加的贡献率

Fig.5　Contribution of climate change and human activities to the increase in SIF in the loess plateau and its ecological subregions

3.3.3 参数优化 空间尺度选择对揭示景观格局规律至关重要:尺度过小易受局部异质性干扰,掩盖区域总体规律[59];尺度过大则弱化空间细节,损失格局信息.根据研究区域范围与多源数据的分辨率并结合相关研究[60],发现在5~10km尺度下能最佳地表征景观格局特征,因此,研究设定 5, 6,7,8,9 和 10km 共 6 种尺度梯度进行优化,在排除无效值之后,分别生成了 25568,17760,13047, 10000,7894 和 6391 个有效网格.通过对比所有驱动因素 q 的 90%分位数,发现 q 值基本呈先增加后减少的趋势(图 7),在空间网格为 6km 时达到最大值 0.659,而超过 6km 后,q 值均有所下降.最终选择 6km 网格作为 OPGD 的最佳空间分析尺度.

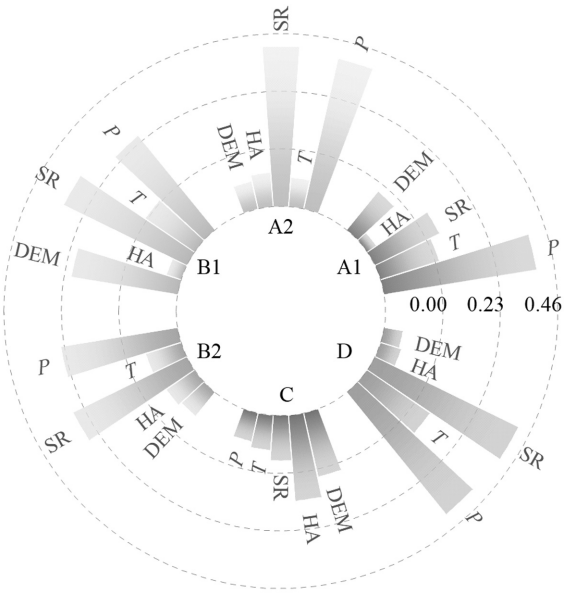


图 6 单因子探测结果

Fig.6 Result of single factor detection

在 6km 的尺度下,对驱动因子进行离散化参数优化.不同离散化方法的最佳参数组合和断点数对因子解释力有显著影响(图 8).以年降水量(P)为例,当离散数设置为 5 时,标准差法的解释力明显优于其他分类方法.在此情况下,年降水量和太阳辐射的最优参数组合选择了基于 10 个间断点的自然间断点法,高程的最优参数组合为基于 9 个间断点的自然间断点法,而气温和人类活动的最优参数组合分别为基于 8 个间断点的分位数法和基于 10 个间断点的几何间隔法.

3.3.4 交互探测 为了量化两因子的交互作用,进一步做了交互探测分析(图 9).结果表明,在黄土高原全区、B1 副区和 B2 副区,P∩SR 的交互作用 q 值最高,分别为 0.75、0.77 和 0.67;在 A1 副区,P∩TEMP 的交互作用解释力最强,q 值为 0.74;在 A2 副区和 D 区,HA∩SR 的交互作用解释力最强,q 值分别为 0.79 和 0.75;而在 C 区 DEM∩TEMP 的交互作用 q 值最高,达到 0.48.

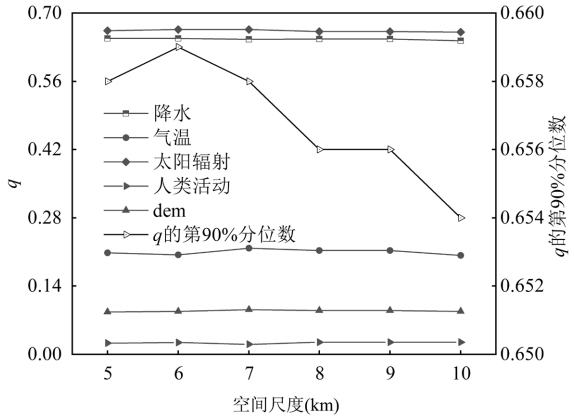


图 7 驱动因素 q 和 90%分位数的空间单元尺度效应比较

Fig.7 Comparison of size effects of spatial units for q values and 90% quantile of driving factors

各因子间的共同作用显著增强了对植被光合动态变化的解释力,且所有交互作用类型均表现为双因子增强或非线性增强,未出现减弱或独立情况,表明 SIF 指数的空间异质性并非由单一因子所主导,而是受到多种因子共同影响,且因子间的相互作用进一步强化了对 SIF 指数空间分异性的解释力.结合因子探测结果,各生态分区内主导驱动因子(如 A 区的降水、B2 区的太阳辐射)与其他环境因子的协同效应显著强于非主导因子间的交互作用(q 值提升幅度达 35%~62%).这表明降水和太阳辐射的协同作用对植被光合动态有着强烈的非线性影响.降水和太阳辐射的结合不仅直接影响植物生长,还通过调节土壤湿度、气温以及光照强度等多重因素,影响植被的光合作用效率.

此外,C 区各驱动因子的交互作用 q 值普遍较低,表明人类活动与其他自然因子的结合效应超过了单个因子效应的简单叠加,形成了一个更为复杂的增强效应.尽管该区整体交互解释力较弱,但这种现象仍揭示了人与自然之间的复杂耦合关系.

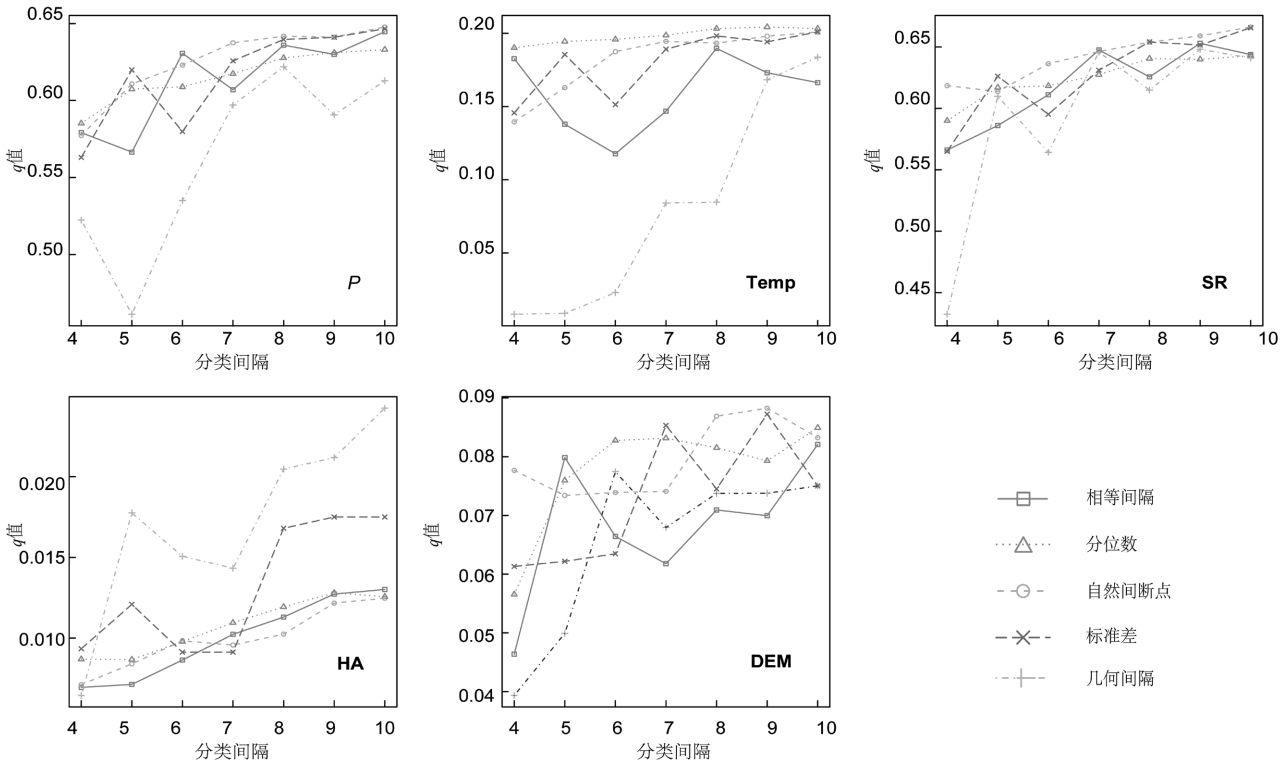


图 8　参数优化结果

Fig.8　Result of parameter optimization

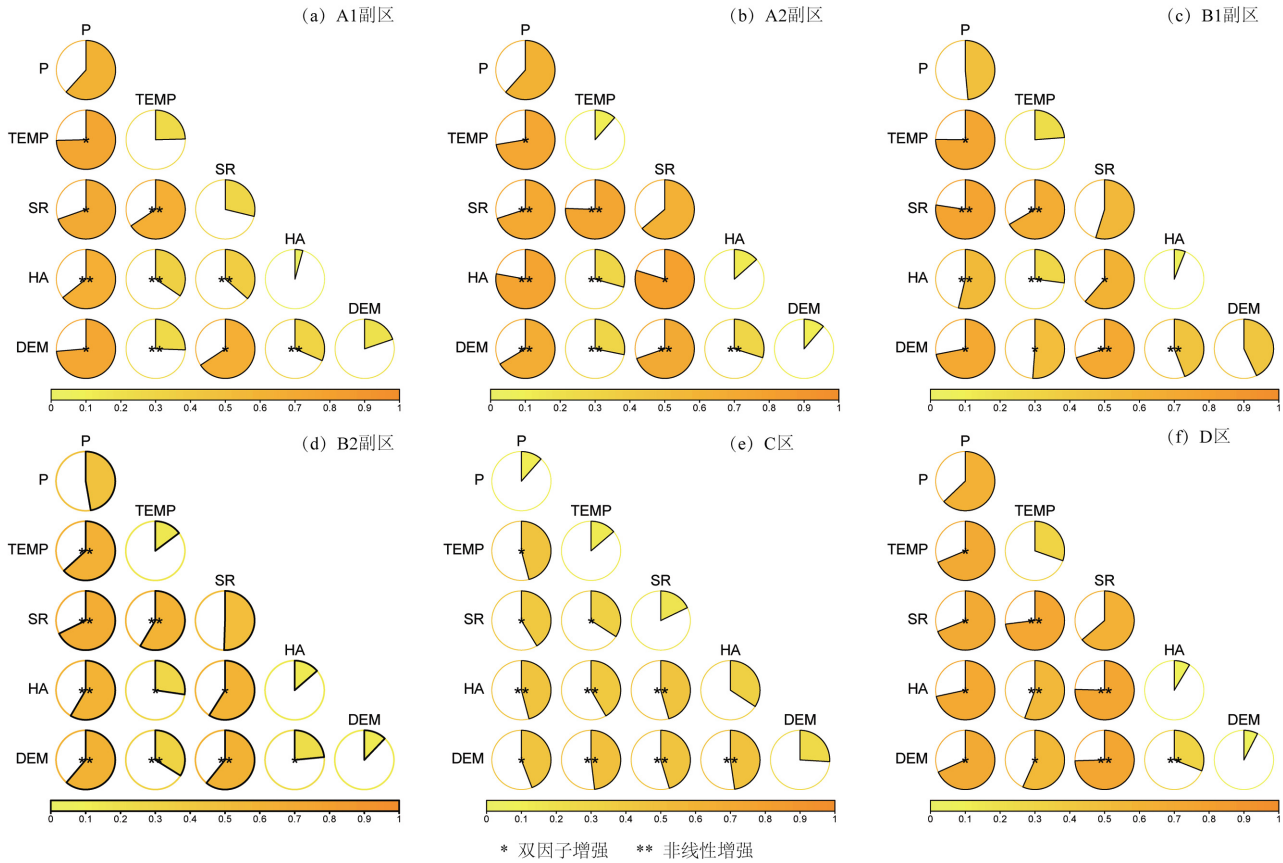


图 9　不同生态分区交互探测分析结果

Fig.9　Result of interaction detector analysis of various ecological subregions

4 讨论

4.1 SIF 指数在黄土高原地区的适用性

研究结果表明,研究期内黄土高原 82.48%的区域 SIF 呈现出明显的改善趋势,显著改善区域占76.23%,呈现退化趋势的区域仅占 0.46%,主要分布在 A1 副区西部青海省、D 区南部关中平原、C 区西部宁夏平原及北部内蒙古自治区.对比 NDVI 的研究结果发现[61-63],两者表现出整体相似的趋势特征,而在退化热点区域 SIF 数据表现出独特敏感性(图 10):以关中平原城市群核心区(D 区)与 A1 副区西宁段为例,SIF 数据识别出存在显著退化,而该区域的 NDVI 则表现为轻微退化,这一差异可能源于 NDVI 主要通过植被的红光和近红外反射率评估植被绿度,反映的是植被的覆盖度.因此,NDVI 对环境变化的响应较 SIF 存在一定滞后性,尤其在土壤中有较多植被残留或低矮植物分布区,即使植被质量已下降,NDVI 仍可能因覆盖度维持较高水平而低估退化程度.相比之下,SIF 能够直接反映植被的光合作用效率.例如,在 D 区晋中城市群等区域,尽管 NDVI 显示植被覆盖度未发生显著变化,但 SIF 却检测到光合效率显著下降.这表明,在水分或养分不足的情况下,植物虽能保持绿色覆盖,光合作用效率却已受到显著抑制,从而导致 SIF 显示出明显的下降趋势.因此 SIF 能够突破植被结构的限制,精确地反映出生态功能的退化趋势[15].

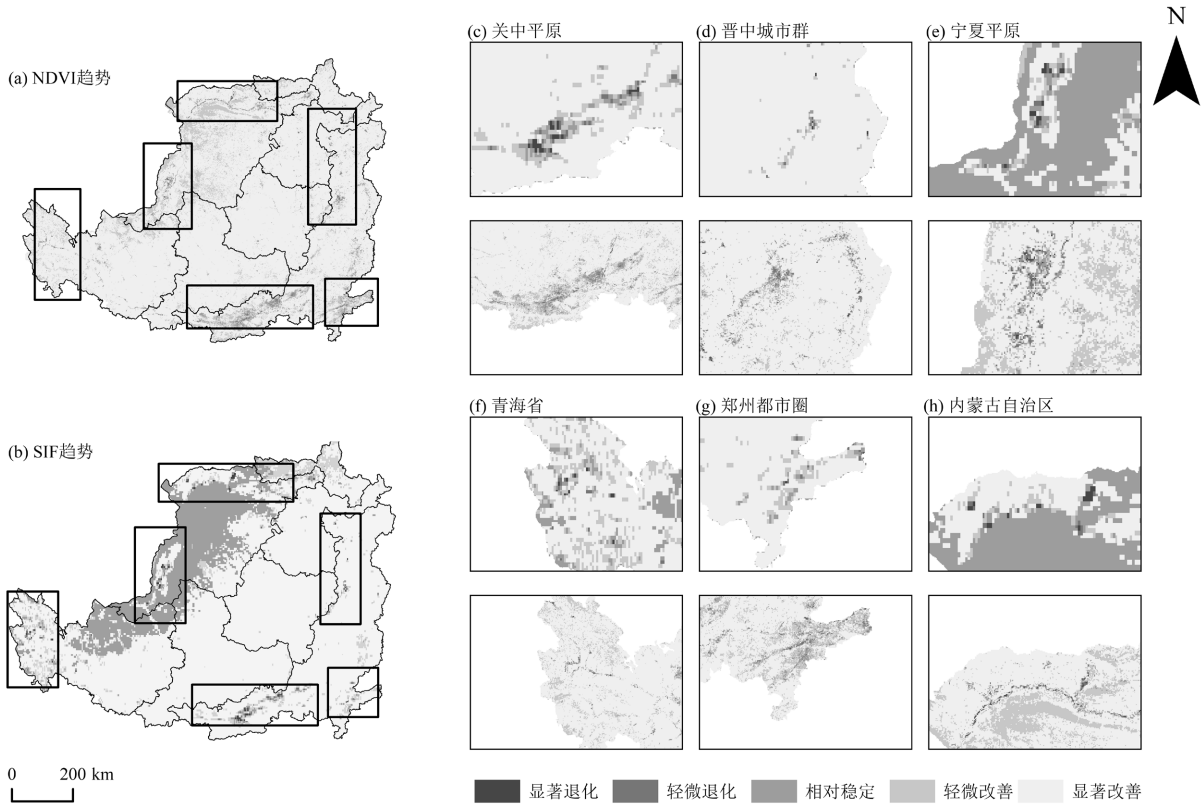


图 10 2002~2022 年 NDVI 及 SIF 趋势对比

Fig.10 Comparative analysis of NDVI and SIF trends during 2002~2022

4.2 生态工程驱动与地理异质性耦合下的植被光合动态响应机制

退耕还林还草工程实施以来,黄土高原生态恢复成效明显,前文结果表明 SIF 呈显著增长趋势(P<0.05),印证了退耕还林工程背景下植被光合活性与碳汇能力的协同提升,这与“黄土高原植被恢复驱动碳汇提升”结论一致[64],且人类活动对 SIF 变化表现出的高贡献率(73.27%)进一步凸显出生态工程与农业集约化管理对生态修复的重要作用.A 区 SIF 指数增长速率较快,该地区地处半湿润气候向半干旱的过渡带,有较高降水、光热资源丰富等特点:其中 A2 副区 SIF 增长的“双高特征”(增速快、绝对增

量大),这种“双高”模式揭示了自然修复基底-人工干预增效的协同机制.B 区整体增长速率优于全区整体水平,且 B2 副区的 SIF 指数增长速率大于其他区域,这与该地区实施的生态修复工程有着密切联系.作为退耕还林还草的核心实施区,其大规模植被恢复有效提升了地表覆盖度与根系固土能力,同时减弱了雨滴能量、减少雨水飞溅侵蚀、延缓地表径流、减少地表冲刷、有效抑制土壤侵蚀、增强土壤保持服务[40,65-67],该地区退耕还林(草)等生态工程效益显著,境内林、草覆盖率显著提升[68];区内固碳量整体增加与退耕还林实施区域高度一致.此外,由于历史时期过度放牧与坡耕地扩张,B2 副区 SIF 指数在 2000 年前后处于较低水平,通过生态工程的实施实现了增长,但受限于基础环境条件其绝对增量仍低于自然条件优越的 A 区.C 区地处西北干旱区,气候干燥、少雨且蒸发量大,植被多以旱生灌木为主,植被覆盖度低;受自然环境原因,该地区生态恢复难度大,同时长期不合理的土地利用使得该地区 SIF 指数呈现“双低特征”(增速慢,绝对增量小),尽管生态修复工作有所推进,但光合作用效率提升的速度有限,生态恢复进展缓慢.D 区为土石山及河谷平原地区,该区域具有黄土层薄、石料丰富等特点[42],是研究区的水源涵养区域,植被恢复的潜力较大,因此该区的 SIF 指数增长相对较快;同时降水相对丰富且集中,区内多为谷地,地势平坦,是黄土高原重要的农业区和经济活动的核心地段;该地区自然条件最优,自然禀赋好,但是由于聚集了西安、郑州和太原等大型城市,区域经济活动频繁,受人类活动影响强度较大,面临着经济发展与生态保护之间的平衡问题[69].

此外,参数最优地理探测器结果进一步深化了 SIF 时空驱动机制.年降水量和年太阳总辐射被识别为影响 SIF 空间分异的主要因素[70],表明气候因子在调控植被光合作用活性方面作用高于人类活动.水分是 SIF 变化的主要限制因子,降水量直接影响土壤水分供应,从而决定植物光合作用效率[71].黄土高原年降水量呈东南高西北低的空间分布格局,决定了 SIF 的空间分异;而黄土高原太阳辐射空间上自东南到西北递增,且过强的辐射可能导致光抑制现象,尤其在水分不足时更为明显[72],因此降水是植被光合的效率与空间分异核心决定因素.同时因子间的交互作用进一步增强了对 SIF 指数变化的解释力,不同生态分区内的因子交互类型和作用模式存在差异,在植被动态监测和生态恢复评估中,需要综合考虑多因子的复合作用,以更准确地理解植被光合作用的空间异质性.

5　结论

5.1　基于 2002~2022 年 GOSIF 数据与参数最优地理探测器分析,黄土高原植被光合作用(SIF)时空分异显著:年均 SIF 增速为 0.0006~0.0024W/(m^2·μm·sr·a)](P<0.05),空间上呈“西–东南高、西北低”格局,其中 B2 区增长最快、C 区最慢; D 区南部、A1 副区北部及 C 区西南部发展滞后,而中南部生态工程区恢复最优.

5.2　自然因子解释力显著高于人为因子(P<0.01),A1 副区和 C 区分别受降水与人类活动主导,A2 副区、B 区和 D 区则由太阳辐射驱动;因子交互类型均呈增强效应(双因子或非线性增强),主导因子协同效应尤为显著.C 区人类活动－自然因子交互虽 q 值较低,但仍表现为非线性增强,揭示人为－自然耦合的复杂正反馈;

5.3　94.83%区域 SIF 改善由气候与人类活动共同驱动,人类活动贡献率(73.27%)显著高于气候因子(26.73%),其中生态工程区与农业带以人类主导(>70%),西北干旱区及高寒区则受气候控制(>50%).

参考文献:

[1] 高启慧,秦圆圆,梁媚聪,等.IPCC 第六次评估报告综合报告解读及对我国的建议 [J]. 环境保护, 2023,51(Z2):82-84.
Gao Q H, Qin Y Y, Liang M C, et al. Interpretation of the main conclusions and suggestions of IPCC AR6Synthesis Report [J]. Environmental Protection, 2023,51(Z2):82-84.

[2] 宋文婷,杨海杰,邵昕煜,等.蓝碳对气候变化的响应、减缓与适应——IPCC 第六次气候变化评估报告解读与启示 [J]. 自然资源情报, 2025,(6):122-126,134.
Song W T, Yang H J, Shao X Y, et al. Blue carbon's response, mitigation and adaptation to climate change: interpretation and implications of the IPCC Sixth Assessment Report [J]. Natural Resources Information, 2025,(6):122-126,134.

[3] Misal H, Hoare V C, Miles V, et al. Responding to the climate crisis-taking action on the IPCC 6th Assessment Report [J]. Weather, 2022,77(4):149-150.

[4] 陈效逑,王　恒.1982~2003 年内蒙古植被带和植被覆盖度的时空变化 [J]. 地理学报, 2009,64(1):84-94.
Chen X Q, Wang H. Spatial and temporal variations of vegetation belts

and vegetation cover degrees in Inner Mongolia from 1982 to 2003 [J]. Acta Geographica Sinica, 2009,64(1):84−94.

[5] 王晶晶,朱 烨,刘 懿,等.2000~2022 年中国植被恢复力时空特征及演变趋势 [J]. 农业工程学报, 2025,41(3):136−143.
Wang J J, Zhu Y, Liu Y, et al. Spatiotemporal characteristics and variation tendency of vegetation resilience over China during 2000~2022 [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2025,41(3):136−143.

[6] 姜田亮,粟晓玲,郭盛明,等.西北地区植被耗水量的时空变化规律及其对气象干旱的响应 [J]. 水利学报, 2021,52(2):229−240.
Jiang T L, Su X L, Guo S M, et al. Spatiotemporal variation of vegetation water consumption and its response to meteorological drought in Northwest China [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021,52(2):229−240.

[7] Cong N, Wang T, Nan H, et al. Changes in satellite−derived spring vegetation green−up date and its linkage to climate in China from 1982 to 2010: a multimethod analysis [J]. Global Change Biology. 2013,19(3):881−891.

[8] 李石磊.日光诱导叶绿素荧光遥感反演研究 [D]. 北京:中国农业科学院, 2024.
Li S L. Retrieval of sun−induced chlorophyll fluorescence from remotely sensed data. [D] BeiJing: Chinese Academy of Agricultural Sciences Thesis, 2024.

[9] 侣海翔,王瑞燕,王秋红.黄河流域植被光合动态时空演变及归因分析——基于日光诱导叶绿素荧光数据 [J]. 生态学报, 2024,44(13):5695−5705.
Si H X, Wang R Y, Wang Q H. Temporal and attribution analysis of vegetation photosynthesis dynamics in the Yellow River Basin based on satellite−derived SIF [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024,44(13):5695−5705.

[10] Liu L Z, Yang X, Zhou H K, et al. Evaluating the utility of solar−induced chlorophyll fluorescence for drought monitoring by comparison with NDVI derived from wheat canopy [J]. Science of the Total Environment. 2018,625:1208−1217.

[11] Mohammadi K S, Jiang Y L, Wang G L, et al. Flash drought early warning based on the trajectory of solar−induced chlorophyll fluorescence [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 2022,119(32):e2202767119.

[12] Meng F D, Dan L, Wang Y L, et al. Negative relationship between photosynthesis and late−stage canopy development and senescence over Tibetan Plateau [J]. Global Change Biology, 2023,29(11):3147−3158.

[13] Zhang Y, Commane R, Zhou S, et al. Light limitation regulates the response of autumn terrestrial carbon uptake to warming[J]. Nature Climate Change, 2020,10(8):739−743.

[14] Zhang Y, Joiner J, Alemohammad H S, et al. A global spatially contiguous solar−induced fluorescence (CSIF) dataset using neural networks [J]. Biogeosciences, 2018,15(19):5779−5800.

[15] Li X, Xiao J. A global, 0. 05−degree product of solar−induced chlorophyll fluorescence derived from OCO−2, MODIS, and reanalysis data [J]. Remote Sensing, 2019,11:517.

[16] Liu L, Zhao W, Wu J, et al. The impacts of growth and environmental parameters on solar−induced chlorophyll fluorescence at seasonal and diurnal scales [J]. Remote Sensing, 2019,11(17):2002.

[17] 章钊颖,王松寒,邱 博,等.日光诱导叶绿素荧光遥感反演及碳循环应用进展 [J]. 遥感学报, 2019,23(1):37−52.
Zhang Z Y, Wang S H, Qiu B, et al. Retrieval of sun−induced chlorophyll fluorescence and advancements in carbon cycle application [J]. National Remote Sensing Bulletin, 2019,23(1):37−52.

[18] Anniwaer N, Li X Y, Wang K, et al. Shifts in the trends of vegetation greenness and photosynthesis in different parts of Tibetan Plateau over the past two decades [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2024,345:109851.

[19] 周玉科,张瑞欣,孙文彬.基于日光诱导叶绿素荧光的东北地区植被物候时空特征及其对气候的响应 [J]. 遥感技术与应用, 2024,39(1):185−197.
Zhou Y K, Zhang R X, Sun W B, et al. Spatiotemporal characteristics of vegetation phenology in northeast China based on Solar−induced Chlorophyll Fluorescence and response to climate [J]. Remote Sensing Technology and Application 2024,39(1):185−197.

[20] Song L, Guanter L, Guan K Y, et al. Satellite sun-induced chlorophyll fluorescence detects early response of winter wheat to heat stress in the Indian Indo−Gangetic Plains [J]. Global Change Biology. 2018,24(9):4023−4037.

[21] Farquhar G D, Von Caemmerer S, Berry J A. A biochemical model of photosynthetic CO_2assimilation in leaves of C_3species [J]. Planta, 1980,149(1):78−90.

[22] Evans J R, Sharkey T D, Berry J A, et al. Carbon isotope discrimination measured concurrently with gas exchange to investigate CO_2 diffusion in leaves of higher plants [J]. Australian Journal of Plant Physiology. 1986,13(2):281−292.

[23] 邢红爽,乌佳美,陈 健,等.植物光合作用限制因素与植被生产力研究进展 [J]. 生态学报, 2023,43(12):5186−5199.
Xing H S, Wu M J, Chen J, et al. Research progress on limiting factors of plant photosynthesis and vegetation productivity [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(12):5186−5199.

[24] 祁鹏卫,张 贤.2000~2019 年重庆市植被覆盖时空变化特征及其驱动因素 [J]. 生态学报, 2022,42(13):5427−5436.
Qi W P, Zhang X. Spatiotemporal variation characteristics and driving factors of vegetation cover in Chongqing from 2000 to 2019 [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(13):5427−5436.

[25] 王 涛,杨梅焕.榆林地区植被指数动态变化及其对气候和人类活动的响应 [J]. 干旱区研究, 2017,34(5):1133−1140.
Wang T, Yang M H. Dynamic change of NDVI and its response to climate change and human activities in Yulin, Shaanxi Province, China [J]. Arid Zone Research, 2017,34(5):1133−1140.

[26] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望 [J]. 地理学报, 2017,72(1):116−134.
Wang J F, Xu C D, Geodetector: Principle and prospective [J]. Acta Geographica Sinica, 2017,72(1):116−134.

[27] 奎国娴,史常青,杨建英,等.内蒙古草原区植被覆盖度时空演变及其驱动力 [J]. 应用生态学报, 2023,34(10):2713−2722.
Kui G X, Shi C Q, Yang J Y, et al. Spatial−temporal variations of vegetation coverage and its driving force in Inner Mongolia grassland, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023,34(10):2713−2722.

[28] Song Y Z, Wang J F, Ge Y, et al. An optimal parameters-based geographical detector model enhances geographic characteristics of explanatory variables for spatial heterogeneity analysis: cases with different types of spatial data [J]. GIScience & Remote Sensing, 2020, 57:593-610.

[29] Cen Q Y, Zhou X C, Qiu H F. Exploration of urban neighborhood blue-green space quality patterns and influencing factors in waterfront cities based on MGWR and OPGD models [J]. Urban Climate, 2024, 55,101942

[30] Fu B J, Liu Y, Lye Y H, et al. Assessing the soil erosion control service of ecosystems change in the Loess Plateau of China [J]. Ecological Complexity, 2011,8(4):284-293.

[31] Xin Z B, Xu J X, Zheng W. Spatiotemporal variations of vegetation cover on the Chinese Loess Plateau (1981~2006): Impacts of climate changes and human activities [J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2008,51(1):67-78.

[32] 张　琨,吕一河,傅伯杰,等.黄土高原植被覆盖变化对生态系统服务影响及其阈值 [J]. 地理学报, 2020,75(5):949-960.
Zhang K, Lyu Y H, Fu B J, et al. The effects of vegetation coverage changes on ecosystem service and their threshold in the Loess Plateau [J]. Acta Geographica Sinica, 2020,75(5):949-960.

[33] Lye Y H, Fu B J, Feng X M, et al. A policy-driven large scale ecological restoration: quantifying ecosystem services changes in the Loess Plateau of China [J]. PLOS One, 2017,7(2):e31782.

[34] Chen H S, Shao M A, Li Y Y. Soil desiccation in the Loess Plateau of China [J], Geoderma, 2008,143:91-100.

[35] 张宝庆,邵　蕊,赵西宁,等.大规模植被恢复对黄土高原生态水文过程的影响 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2020,28(3):594-606.
Zhang B Q, Shao R, Zhao X N, et al. Effects of large-scale vegetation restoration on Eco-hydrological Processes over the Loess Plateau, China [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2020,28(3): 594-606.

[36] Wang Y Q, Shao M A, Shao H B. A preliminary investigation of the dynamic characteristics of dried soil layers on the Loess Plateau of China [J]. Journal of Hydrology, 2010,381(1):9-17.

[37] 晏利斌.1961~2014 年黄土高原气温和降水变化趋势 [J]. 地球环境学报, 2015,6(5):276-282.
Yan L B. Characteristics of temperature and precipitation on the Loess Plateau from 1961 to 2014 [J]. Journal of Earth Environment, 2015,6 (5):276-282.

[38] Liu X T, Cai L, Li M Y, et al. Why does afforestation policy lead to a drying trend in soil moisture on the Loess Plateau? [J]. The Science of the Total Environment. 2024, 953:175912.

[39] Xie B N, Jia X Y, Qin Z F, et al. Vegetation dynamics and climate change on the Loess Plateau, China: 1982~2011 [J]. Regional Environment Change, 2016,16:1583–1594.

[40] 杨艳芬,王　兵,王国梁,等.黄土高原生态分区及概况 [J]. 生态学报, 2019,39(20):7389-7397.
Yang Y F, Wang B, Wang G L, et al. Ecological regionalization and overview of the Loess Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019,39 (20):7389-7397.

[41] Peng S Z, Ding Y X, Liu W Z, et al. 1km monthly temperature and precipitation dataset for China from 1901 to 2017 [J]. Earth System Science Data, 2019,11(4):1931-1946.

[42] Mu H W, Li X C, Wen Y A, et al. A global record of annual terrestrial human footprint dataset from 2000 to 2018 [J]. Scientific Data, 2022, 9(1):176.

[43] 王欣毅,杨　洁,林良国,等.基于 Sen+Mann- Kendall 陕西省植被覆盖度时空变化规律研究 [J]. 农业与技术, 2023,43(7):62-66.
Wang X Y, Yang J, Lin L G, et al. Analyzing vegetation coverage dynamics in Shaanxi province (2001~2020) using integrated Sen+ Mann- Kendall approach [J]. Agriculture and Technology, 2023,43(7): 62-66.

[44] 王　涛,伊丽努尔·阿力甫江,李思颖.三种趋势分析法在东帕米尔高原降水特征分析中的应用 [J]. 气象, 2022,48(10):1312-1320.
Wang T, Yilinuer A L F J, Li S Y, et al. Three trend analysis methods in precipitation characteristic analysis of eastern Pamirs [J]. Meteorological Monthly, 2022,48(10):1312-1320.

[45] 汤连盟,吕伟才,蒲　涛,等.西北地区干旱时空动态分布及成因分析 [J]. 遥感信息, 2023,38(5):66-72.
Tang L M, Lv W C, Pu T, et al. Spatio-temporal dynamic distribution and cause analysis of drought in Northwest China [J]. Remote Sensing Information, 2023,38(5):66-72.

[46] 涂　又,姜亮亮,刘　睿,等.1982~2015年中国植被NDVI时空变化特征及其驱动分析 [J]. 农业工程学报, 2021,37(22):75-84.
Tu Y, Jiang L L, Liu R, et al. Spatiotemporal changes of vegetation NDVI and its driving forces in China during 1982~2015 [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021,37(22):75-84.

[47] Zhong R, Wang P F, Mao G Q, et al. Spatiotemporal variation of enhanced vegetation index in the Amazon Basin and its response to climate change [J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C , 2021,123:103024

[48] Evans J, Geerken R. Discrimination between climate and human-induced dryland degradation [J]. Journal of Arid Environments, 2004, 57(4):535-554.

[49] 毕　燕,徐洪琼,陈　乔.广西国内旅游规模区域差异分析 [J]. 重庆师范大学学报:自然科学版, 2012,29(4):118-123.
Bi Y, Xu H Q, Chen Q. On the regional disparity of scale of domestic tourism in Guangxi [J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science), 2012,29(4):118-123.

[50] 贾　路,任宗萍,李占斌,等.2000~2013 年西安市植被覆盖度时空演变 [J]. 水土保持研究, 2019,26(6):274-279.
Jia L, Ren Z P, Li Z B, et al. Temporal and spatial evolution of vegetation coverage in Xi'an city from 2000 to 2013 [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019,26(6):274-279.

[51] Ju H R, Zhang Z X, Zuo L J, et al. Driving forces and their interactions of built-up land expansion based on the geographical detector – a case study of Beijing, China [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2016,30:2188-2207.

[52] 冶兆霞,张洪波,杨志芳,等.陕北黄土高原气象要素对植被覆盖的空间分异影响及风险探测 [J]. 生态学报, 2024,44(6):2379-2395.
Ye Z X, Zhang H B, Yang Z F, et al. Spatial differentiation effects and risk detection of meteorological elements to vegetation cover on the Loess Plateau of northern Shaanxi [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(6):2379-2395.

[53] Hu X S, Xu C M, Chen J, et al. A synthetic landscape metric to evaluate urban vegetation quality: A case of Fuzhou City in China [J]. Forests, 2020.13(7):1002−1002.

[54] 李 琛,吴映梅,高彬嫔,等.高原湖泊乡村聚落空间分异及驱动力探测——以环洱海地区为例 [J]. 经济地理, 2022,42(4):220−229.
Li C, Wu Y M, Gao B P, et al. Spatial differentiation and driving factors of rural settlement in plateau lake: A case study of the area around the Erhai [J]. Economic Geography, 2022,42(4):220−229.

[55] 巩 晨.黄土高原不同造林模式生态功能特征及权衡/协同效应 [D]. 杨凌:中国科学院大学(中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心), 2022.
Gong C. Characteristics and trade−off/synergy effects of ecological functions under different afforestation patterns on China’s Loess Plateau [D]. YangLing: Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Education, 2022.

[56] Lyu M K, Xie J S, Giardina C P, et al. Understory ferns alter soil carbon chemistry and increase carbon storage during reforestation with native pine on previously degraded sites [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2019,132:80−92.

[57] 刘 铮,杨金贵,马理辉,等.黄土高原草地净初级生产力时空趋势及其驱动因素 [J]. 应用生态学报, 2021,32(1):113−122.
Liu Z, Yang J G, Ma L H, et al. Spatial−temporal trend of grassland net primary production and their driving factors in the Loess Plateau, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021,32(1):113−122.

[58] 许煜麟,赵雅萍,赵雨晴,等.黄土高原退耕还林(草)前后土壤有机碳密度变化及其对气候变化和人类活动的响应 [J]. 环境科学, 2024, 45(8):4696−4708.
Xu Y L, Zhao Y P, Zhao Y Q, et al. Changes in soil organic carbon density and its response to climate change and human activities before and after the Grain for Green Project on the Loess Plateau [J]. Environmental Science, 2024,45(8):4696−4708.

[59] 薛冬冬,佘光辉,温小荣,等.基于地统计分析的南京钟山风景区景观格局尺度效应分析 [J]. 西南林业大学学报, 2012,32(1):30−35,111.
Xue D D, She G H, Wen X R, et al. Scale effect of landscape pattern of Nanjing Zhongshan Scenic Spot Based on Statistic Analysis [J]. journal of Southwest Forestry University(Natural Sciences), 2012,32 (1):30−35,111.

[60] 杨 馗,信桂新,蒋好雨,等.基于最佳尺度的景观生态风险时空变化研究:以重庆市江津区为例 [J].生态与农村环境学报, 2021,37(5): 576−586.
Yang K, Xin G X, Jiang H Y, et al. Study on spatiotemporal changes of landscape ecological risk based on the optimal spatial scale: A case study of Jiangjin District, Chongqing City [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2021,37(5):576−586.

[61] Wang Z Z, Fu B J, Wu X T, et al. Vegetation resilience does not increase consistently with greening in China’s Loess Plateau [J]. Communications Earth and Environment, 2023,4(1),336.

[62] 刘 悦,刘欢欢,陈 印,等.2000~2018 年中国植被光学厚度时空动态特征及驱动因素 [J]. 地理学报, 2023,78(3):729−745.
Liu Y, Liu H H, Chen Y, et al. Spatio−temporal dynamics of vegetation optical depth and its driving forces in China from 2000 to 2018 [J]. Acta Geographica Sinica, 2023,78(3):729−745.

[63] 邵全琴,刘树超,宁 佳,等.2000~2019 年中国重大生态工程生态效益遥感评估 [J]. 地理学报, 2022,77(9):2133−2153.
Shao Q Q, Liu S C, Ning J, et al. Assessment of ecological benefits of key national ecological projects in China in 2000~2019 using remote sensing [J]. Acta Geographica Sinica, 2022,77(9):2133−2153.

[64] Feng X M, Fu B J, Piao S L, et al. Revegetation in China’s Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits [J]. Nature Climate Change, 2016,6(11):1019−1022.

[65] 何 亮.黄土高原植被覆盖变化特征及驱动力分析 [D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2021.
He L. Analysis on the variation characteristics and driving forces of vegetation Cover in the Loess Plateau [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2021.

[66] Feng X M, Fu B J, Lu N, et al. How ecological restoration alters ecosystem services: an analysis of carbon sequestration in China's Loess Plateau [J]. Scientific Reports, 2013,3(1):2846.

[67] 沙小燕,李 魁,王文龙,等.黄土高塬沟壑区草地沟头立壁土壤抗冲性特征 [J]. 应用生态学报, 2022,33(1):133−140.
Sha X Y, Li K, Wang W L, et al. Characteristics of soil anti−scouribility in gully head wall of grass−covering on the gullied Loess Plateau, Northwest China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022,33(1):133−140.

[68] 包玉斌.陕北黄土高原退耕还林还草工程固碳效应研究 [J]. 安徽农业科学, 2021,49(17):55−60.
Bao Y B. Study on carbon storage benefits of the Grain for Green Program in Loess Plateau of Northern Shaanxi Province [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2021,49(17):55−60.

[69] 庄少豪.黄土高原生态系统服务功能对植被恢复的响应关系研究 [D]. 西安:西安理工大学, 2020.
Zhuang S H. Study on the response relationship of ecosystem service function of Loess Plateau to vegetation restoration. [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020.

[70] 周怡婷,严俊霞,刘 菊,等.2000～2021 年黄土高原生态分区 NEP 时空变化及其驱动因子 [J]. 环境科学, 2024,45(5):2806−2816.
Zhou Y T, Yan J X, Liu J, et al. Spatio−temporal variation in NEP in ecological zoning on the Loess Plateau and its driving factors from 2000 to 2021 [J]. Environmental Science, 2024,45(5):2806−2816.

[71] 王麒翔,范晓辉,王孟本.近 50 年黄土高原地区降水时空变化特征 [J]. 生态学报, 2011,31(19):5512−5523.
Wang Q X, Fan X H, Wang M B. Precipitation trends during 1961~2010 in the Loess Plateau region of China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011,31(19):5512−5523.

[72] Gottfried M, Pauli H, Futschik A. Continent−wide response of mountain vegetation to climate change [J]. Nature Climate Change, 2012,2(2):111−115.

作者简介: 周 连(2001−),男,陕西西安人,长安大学博士研究生,主要从事黄河流域生态监测与生态保护修复研究.2271331954@qq.com.