

“两高一全”专栏:黄河流域高质量发展

【特约主持人】王家耀:中国工程院院士

【主持人按语】黄河文化与生态环境格局之间存在深刻的相互依存关系,二者在历史演进中相互塑造,共同构成独具特色的黄河生态文化.2025年6月生态环境部、文化和旅游部、中国文联、中国作协联合印发《关于进一步加强生态文明建设的指导意见》,全面推进生态环境高水平保护和经济社会高质量发展是当前黄河国家战略实施中的重点领域.黄河流域地貌单元多样、气候环境差异显著、地域文化特色鲜明,阐释黄河流域生态文化空间格局是系统掌握黄河流域生态文化资源本底的重要基础.本专栏围绕黄河生态环境、非物质文化遗产空间格局进行讨论,其中《黄河流域多尺度时间序列生态环境评价研究》聚焦黄河流域生态环境质量空间分异特征与动态变化规律,从年、季、月尺度定量评价了2001—2022年的生态环境质量,对未来的生态环境变化趋势进行了科学分析.《黄河流域国家级非物质文化遗产空间格局分布研究》利用地理空间统计分析方法,定量研究了黄河流域国家级非物质文化遗产资源的集聚性、相关性和差异性,构建了“一核三带多点”的空间结构,指出了非物质文化遗产随着地理环境格局演变而动态演化的规律.

黄河流域多尺度时间序列生态环境评价研究

李宁,袁元元,李定宇,刘文路,张洁,潘琪,郭建忠,王家耀

(河南大学 遥感与空间信息工程学院;地理科学与工程学部;
河南省时空大数据产业技术研究院,郑州 450046)

摘要:掌握黄河流域多尺度时间序列的生态环境质量空间分异特征与动态变化规律,是实现区域经济发展和生态环境协同共生的关键.然而受限于当前遥感生态环境质量评价模型的自动化水平,现有研究仍停留在年尺度的粗糙时间单元.研究立足遥感生态指数(RSEI)模型存在的问题,聚焦多时间尺度序列的生态环境评价需求,构建了时空生态环境质量指数模型,并以黄河流域为例,开展了年、季、月尺度的生态环境质量研究,验证了模型的可行性和可靠性.研究结果表明黄河流域生态环境质量具有明显的时空异质性,空间上整体呈现南高北低的分异特征,但冬季出现南低北高的趋势;时间上年、季节、月度均呈现缓慢改善趋势,其中春、冬季生态环境呈改善趋势,夏、秋季呈恶化趋势,且改善趋势大于恶化趋势;1月生态环境最差,9月生态环境最好,月均生态环境质量曲线呈抛物线形状.

关键词:生态环境;黄河流域;多尺度;时间序列

中图分类号:X821

文献标志码:A

文章编号:1000-2367(2026)03-0001-10

收稿日期:2025-12-23;**修回日期:**2026-01-22.

基金项目:国家自然科学基金(42401377);国家自然科学基金区域创新发展联合基金(U21A2014).

作者简介:李宁(1987—),女,河南荥阳人,河南大学副教授,主要从事生态环境遥感研究,E-mail:lining@henu.edu.cn.

通信作者:郭建忠,E-mail:guojianzhong@vip.henu.edu.cn;王家耀,E-mail:wjy@henu.edu.cn.

引用本文:李宁,袁元元,李定宇,等.黄河流域多尺度时间序列生态环境评价研究[J].河南师范大学学报(自然科学版),2026,54(3):1-10.(Li Ning, Yuan Yuanyuan, Li Dingyu, et al. Multi-scale time series ecological environment assessment in the Yellow River Basin[J]. Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition), 2026, 54(3):1-10. DOI:10.16366/j.cnki.1000-2367.2025.12.23.0002.)

当前生态环境已经成为制约经济发展的重要因素^[1].工业化、城市化的快速发展^[2],全球变暖、水土流失、大气污染、人类活动^[3]等与生态环境和区域可持续发展的矛盾亦日益突出.开展区域多尺度时间序列的生态环境质量评价,探索其空间分异特征与动态变化规律,是制定生态环境保护政策和区域经济发展与生态环境协同共生的关键^[4].黄河流域地域辽阔,地貌和气候类型多样,是中国关键的生态屏障,对中国的经济发展和生态平衡具有重要的作用^[5],开展黄河流域多尺度时间序列的生态环境质量研究,对于厘清区域综合生态环境状况、探索生态环境质量变化规律、制定科学合理的生态环境政策、应对复杂的生态环境变化形式、落实黄河流域生态保护和高质量发展具有现实意义.

遥感技术的快速发展促进了生态环境质量评价的指标从单一生态环境要素转向多元生态环境要素^[6],目前遥感影像数据已成为定量生态环境评价的重要数据来源^[7].2013年徐涵秋^[8]提出了遥感生态指数(remote sensing ecological index, RSEI),以遥感生态环境指标替代生态环境部发布的《生态环境状况评价技术规范》^[9]中的自然指标,实现了区域综合生态环境质量的定量、客观评价,目前该模型已成为定量评价区域综合生态环境质量最广泛的方法之一^[10-11].然而,RSEI模型也具有一定的局限性,RSEI模型以每年10月份的一景晴天无云的遥感影像为数据源测算该年度的生态环境状况,导致当前生态环境质量研究的时间尺度多以年为主^[12-13],且遥感影像的瞬时也决定了测算结果具有偶然性和片面性.不同的生态系统在不同物候期其生态环境状况具有显著的差异,而单一时相的遥感影像仅能够反映瞬时的生态环境质量状况.此外,RSEI模型的主成分解算的权重具有不唯一性,即每个主成分对应两个大小相等、方向相反的权重向量,致使模型的测算结果随机呈现两种相反的结果,学者往往根据经验选择正确的结果,这限制了模型的自动化和批运算的能力^[14].RSEI模型中各指标的静态去量纲化方法无法统一不同时相的影像的量纲标准,导致不同时相的影像的测算结果在时间上不具比较性^[15].RSEI测算结果的不唯一性和不可比较性限制了其开展多尺度时间序列的区域综合生态环境质量评价的研究.

本研究针对RSEI模型无法开展自动化批量运算的问题,通过改进数据源、指标的无量纲化模型、指标耦合模型等,构建了一个时空生态环境质量指数测算模型(spatial-temporal characteristic eco-environment quality index, SCEQI),通过引入特征方向向量改进了指标耦合结果的唯一性和正确性,赋予模型自动化和批处理的能力;利用全序列动态无量纲化方法统一不同时相下各指标的量纲标准,建立不同时相遥感影像测算结果的时空关联,使测算结果在时间上具有可比性;替换遥感大数据作为数据源,协同多时相均值法,实现了不同时间尺度的长时间序列的生态环境质量研究.在此基础上,本研究以黄河流域为例,测算了黄河流域2001—2022年均、年际、季节和月度的综合生态环境质量,并分析了其演变特征,探索了其未来变化趋势.本研究可为区域多尺度时间序列生态环境评价提供创新方法,为生态环境驱动机制机理研究提供多尺度数据,研究结果可为黄河流域生态环境保护和高质量发展政策制定提供科学方法和数据支撑.

1 研究区

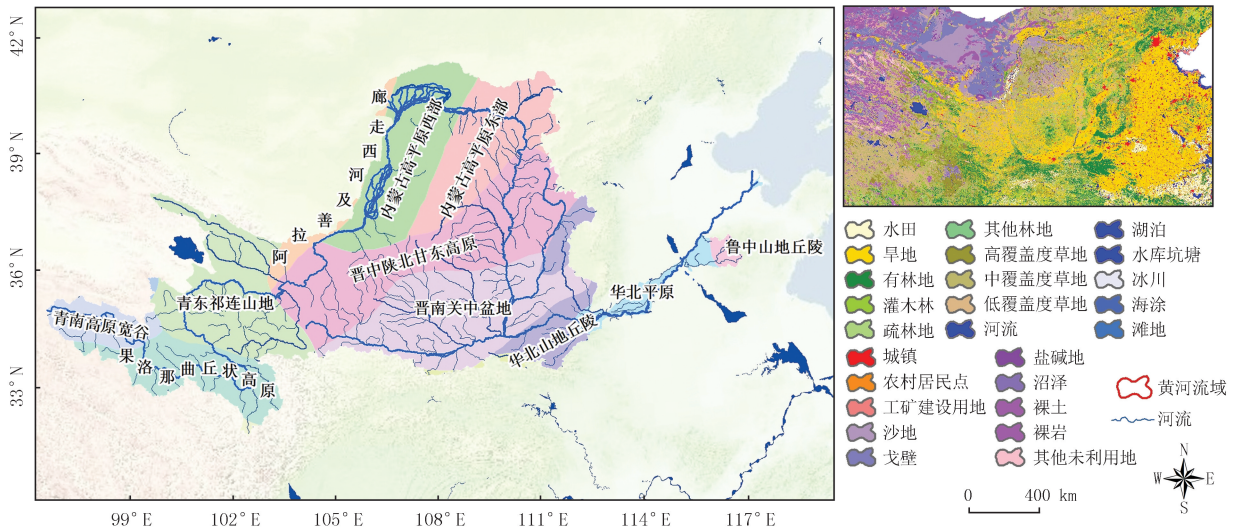
黄河流域位于 $96^{\circ}\text{E}\sim 119^{\circ}\text{E}$, $32^{\circ}\text{N}\sim 42^{\circ}\text{N}$ 之间,总面积为79.5万 km^2 ,地势西高东低,自西向东横跨青藏高原、内蒙古高原、黄土高原和黄淮海平原^[16],包含青南高原宽谷、果洛那曲丘状高原、晋中陕北甘肃高原、阿拉善及河西走廊、晋南关中盆地、内蒙古高平原、华北山地丘陵、华北平原、鲁中山地丘陵生态分区.黄河流域位于半干旱、干旱地区,属于温带季风气候和高原气候,流域面积广阔,流经山岭多,东西地势落差大,气候差异显著^[17].流域主要生态系统类型为草地,占研究区总面积47.59%;其次为耕地,占25.46%;林地占13.26%,未利用地占7.94%,建设用占地占3.87%,水地与湿地生态系统占1.87%.该区气候差异大、地貌单元复杂,是我国生态环境最脆弱的地区之一.

2 研究数据与方法

2.1 数据来源

研究长时序遥感数据源于NASA LP DAAC发布的中分辨率成像光谱仪MODIS的数据产品MOD09A1 V6.1(<https://lpdaac.usgs.gov/products/mod09a1v061/>),该产品空间分辨率为500 m,时间分

分辨率为 8 d,时间长度为 2001—2022 年。



注:基于自然资源部标准地图服务网站审图号为GS(2020)4619号的标准地图制作,底图边界无修改。

图1 研究区概况

Fig.1 Overview of the study area

2.2 研究方法

2.2.1 SCEQI 模型

SCEQI 模型是基于 RSEI 模型,通过改进 RSEI 的数据源、指标无量纲化方法,协同多时相均值法构建而成。该模型由模型去噪、全序列动态无量纲化方法、PCA 自动化指标耦合模型、多时相均值法 4 个模块组成。SCEQI 模型表达如下:

(1) 指标反演与去噪

① 指标反演

本文沿用 RSEI 的绿、热、湿、干 4 个原始指标^[8],计算公式见附录表 S1。

② 指标去噪

为避免影像噪声的影响,取分布在均值两侧二倍标准差距离范围内的值进行统计。

(2) 全序列动态无量纲化方法

全序列动态无量纲化方法采用全时空条件下指标的极大值和极小值作为该指标去量纲的统一标准^[22],在去量纲后能够完整地保留原始指标间的相对关系和增量信息,建立不同时空对象的正确关联,旨在建立不同时空相影像测算结果的时空比较性。计算公式如下:

$$I_i^*(t_k) = \frac{I_i(t_k) - \min_{i,k} \{I_i(t_k)\}}{\max_{i,k} \{I_i(t_k)\} - \min_{i,k} \{I_i(t_k)\}}, k = 1, 2, 3, \dots, N, \quad (1)$$

其中, $I_i^*(t_k)$ 为 I 指标的像元 i 在 k 时刻的无量纲化结果; $I_i(t_k)$ 指该像元 i 在 k 时刻处的 I 指标的原始数据; $\max_{i,k} \{I_i(t_k)\}$ 和 $\min_{i,k} \{I_i(t_k)\}$ 是指标 I 在所有时空条件下的最大值和最小值。

(3) PCA 自动化耦合模型

自动化的指标耦合方法是遥感大数据在生态环境质量评价模型中应用的技术基础。本模型通过引入 NDVI 为方向向量,在每次计算中判断 PCA 第一主成分的特征向量的方向,旨在通过 NDVI 的方向修正特征向量的方向,确保其指标耦合结果的唯一性和正确性。自动化指标耦合模型如下所示:

$$SCEQI_{io} = \begin{cases} v_{11}x_1 + v_{12}x_2 + \dots + v_{1m}x_m, v_{ndvi} > 0, \\ (v_{11}x_1 + v_{12}x_2 + \dots + v_{1m}x_m) * (-1), v_{ndvi} < 0, \end{cases} \quad (2)$$

$$SCEQI_{ik} = \frac{SCEQI_i(t_k) - \min_{i,k} \{SCEQI_i(t_k)\}}{\max_{i,k} \{SCEQI_i(t_k)\} - \min_{i,k} \{SCEQI_i(t_k)\}}, \quad (3)$$

式中, $SCEQI_{i0}$ 为单一时相下, 像元 i 的初始生态环境质量, v_{11}, v_{12}, v_{1m} 为第一主成分的特征向量对应的指标分量的值; x_1, x_2, \dots, x_m 为生态环境的影响因子; $SCEQI_{ik}$ 为像元 i 在 k 时刻生态环境质量指数.

(4) 多时相均值法

多时相均值法旨在用研究时间单元内所有时间节点的 $SCEQI$ 均值表征该时段的综合生态环境质量状况, 多时相均值法表达为:

$$SCEQI_i = \frac{SCEQI_{i1} + SCEQI_{i2} + \dots + SCEQI_{in}}{n}, \quad (4)$$

式中, $SCEQI_i$ 代表像元 i 的综合生态环境质量指数, $SCEQI_{in}$ 指像元 i 在时刻 n 的综合生态环境质量指数, n 为像元 i 参与计算的时相数量.

2.2.2 Theil-Sen's slope 趋势分析

泰尔-森(Theil-Sen's slope)趋势分析法是用斜率序列的均值判断序列的变化趋势, 该方法能够减小缺失值和异常值的影响^[23]. 设时间序列 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_t$ (t 为时间序列长度), 测算模型如下:

$$S_L = \text{Mediam}\left(\frac{x_j - x_i}{j - i}\right), j > i, \quad (5)$$

其中, x_i 和 x_j 代表时间序列中 i 时刻和 j 时刻的序列值, 其中 $1 \leq i \leq j \leq t$. 当 $S_L > 0$ 时, 表示该时间序列为上升趋势; 当 $S_L = 0$ 时, 表示该时间序列为无明显变化趋势; 当 $S_L < 0$ 时, 表示该时间序列为下降趋势. 使用 Mann-kendall 非参数统计检验评估趋势的显著性.

$$S = \sum_{i=1}^{t-1} \sum_{j=i+1}^t \text{sgn}(x_j - x_i). \quad (6)$$

统计量 S 计算, 其中, x_i 和 x_j 是时间序列中的数据点, 且 $j > i$, sgn 是符号函数, 定义如下:

$$\text{sgn}(z) = \begin{cases} 1, & z > 0, \\ 0, & z = 0, \\ -1, & z < 0. \end{cases} \quad (7)$$

方差 $\text{var}(S)$ 计算:

$$\text{var}(S) = \frac{t(t-1)(2t+5)}{18}. \quad (8)$$

标准化检验统计量 Z 的计算:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{var}(S)}}, & S > 0, \\ 0, & S = 0, \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{var}(S)}}, & S < 0. \end{cases} \quad (9)$$

显著性检验: 根据 Z 值, 使用标准正态分布来评估趋势的显著性. 如果 Z 大于正态分布的临界值, 则认为趋势显著.

2.2.3 Hurst 指数与 R/S 分析

Hurst 指数是根据 RSEI 的长时间序列数据预测未来数据的变化趋势^[2]. 本文使用重标极差分析(R/S 分析)计算研究区遥感生态指数 Hurst 指数. 其中 R 代表不同时滞的极差, S 代表不同时滞的标准差. 计算方法如下:

$$\frac{R}{S} = \frac{R_i(m)}{S_i(m)} \propto \left(\frac{m}{2}\right)^{HI}, \quad (10)$$

HI 为 Hurst 指数, $R_i(m)$ 为极差序列, $S_i(m)$ 为标准差序列, $m = n - 1$, n 为时间序列中的时间点. $HI = 0.5$ 时, 表示时间序列数据是随机的; $HI > 0.5$, 表示时间序列数据具有持久性, 即未来的趋势可能与过去的趋势相同; $HI < 0.5$, 表示时间序列数据具有反持续性, 即未来的趋势可能与过去的趋势相反.

3 结果与分析

3.1 黄河流域 SCEQI

3.1.1 年平均 SCEQI

黄河流域 2001—2022 年平均综合生态环境指数均值介于 0.229 和 0.715 之间,呈现出明显的南北分异特征,如图 2(a)所示. SCEQI 高值集中分布在黄河流域北部的内蒙古高原,晋中陕北甘东高原次之,低值区集中分布在青东祁连山地、果洛那曲丘状高原南部、晋南关中盆地、华北山地丘陵地区. 参考《生态环境状况评价技术规范 (HJ192—2015)》,采用自然间断分隔法将 SCEQI 分为 5 级,即差、较差、一般、良和优,分别占研究区面积的 18.97%、21.28%、21.07%、23.64% 和 15.05%,分级结果如图 2(b)所示.

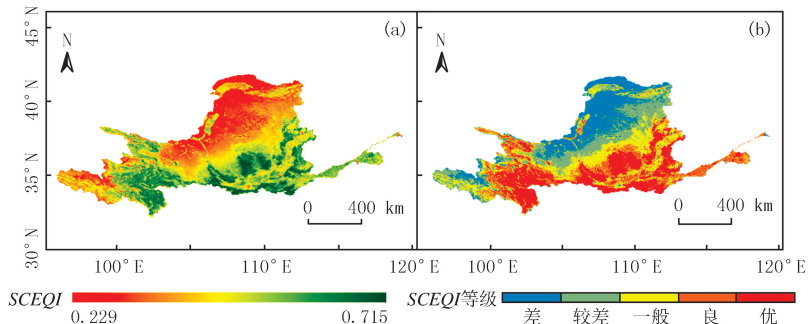


图2 2001—2022年平均SCEQI空间分布

Fig.2 Spatial distribution of average SCEQI from 2001 to 2022

3.1.2 年际 SCEQI

空间上,黄河流域 2001—2022 年际 SCEQI 空间分布特征和年均 SCEQI 一致(附录图 S1),依然呈明显南高北低态势. 时间上,2007—2009、2011、2017—2022 年的综合生态质量指数高于平均水平,2001—2006、2010、2013—2016 年的综合生态质量指数低于平均水平(图 3),研究期内 SCEQI 以 $1.25 \times 10^{-4} \text{ a}^{-1}$ 速率增长,表明黄河流域 2001—2022 年综合生态环境整体呈缓慢改善趋势.

3.1.3 季节 SCEQI

空间上,黄河流域 SCEQI 具有明显的季节性差异(图 4),春、夏、秋季南部生态环境均明显优于北部,而冬季则有相反趋势. 夏季南北生态环境差异最大,春季次之,秋季差异更小,冬季则呈现相反趋势. 时间上,黄河流域 2001—2022 年各季节 SCEQI 均值表现为: $SCEQI_{秋} (0.5184) > SCEQI_{夏} (0.5128) > SCEQI_{春} (0.5056) > SCEQI_{冬} (0.4999)$. 季节变化上(图 5),整体变化趋势与年际趋势相同,研究区期内 SCEQI 呈微弱上升趋势,其中春季和冬季以上升变化为主,上升速率分别为 $2.77 \times 10^{-4} \text{ a}^{-1}$ 和 $2.75 \times 10^{-4} \text{ a}^{-1}$,夏季和秋季以下降变化为主,下降速率为 $0.39 \times 10^{-4} \text{ a}^{-1}$ 和 $0.86 \times 10^{-4} \text{ a}^{-1}$,表明期内黄河流域春、冬季生态环境呈改善趋势,夏、秋季呈恶化趋势,且改善趋势大于恶化趋势.

3.1.4 月度 SCEQI

月尺度上,黄河流域 2001—2022 年 SCEQI 介于 0.49 和 0.52 之间,各月份 SCEQI 由大到小依次为: 9、10、8、11、7、5、6、4、3、12、2、1 月,整体上依然呈微弱改善趋势(附录图 S2),增长速率为 $0.1 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$,表示黄河流域生态环境质量在研究期内略有改善(与年、季变化趋势相同). 平均月值曲线呈抛物线形状先上升后下降(附录图 S3),其中 1 月 SCEQI 值最低,9 月 SCEQI 到达极值,表明研究区 1 月的综合生态环境质量最差,9 月的综合生态环境质量最优.

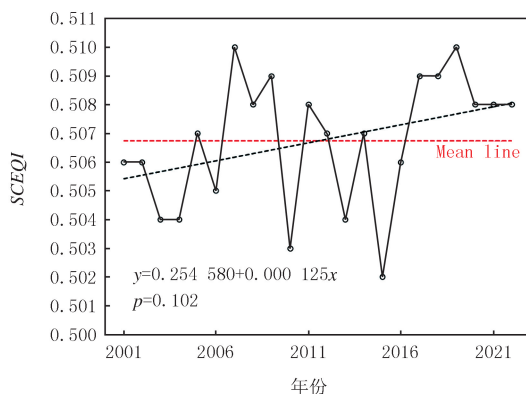


图3 2001—2022年黄河流域年际SCEQI折线图

Fig.3 Line chart of interannual SCEQI in the Yellow River Basin from 2001 to 2022

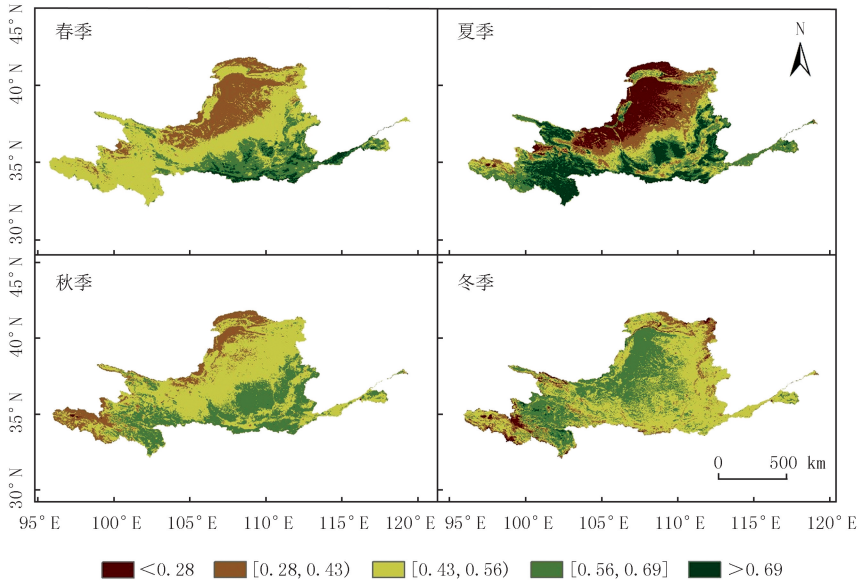


图4 2001-2022年黄河流域季节SCEQI空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of seasonal SCEQI in the Yellow River Basin from 2001 to 2022

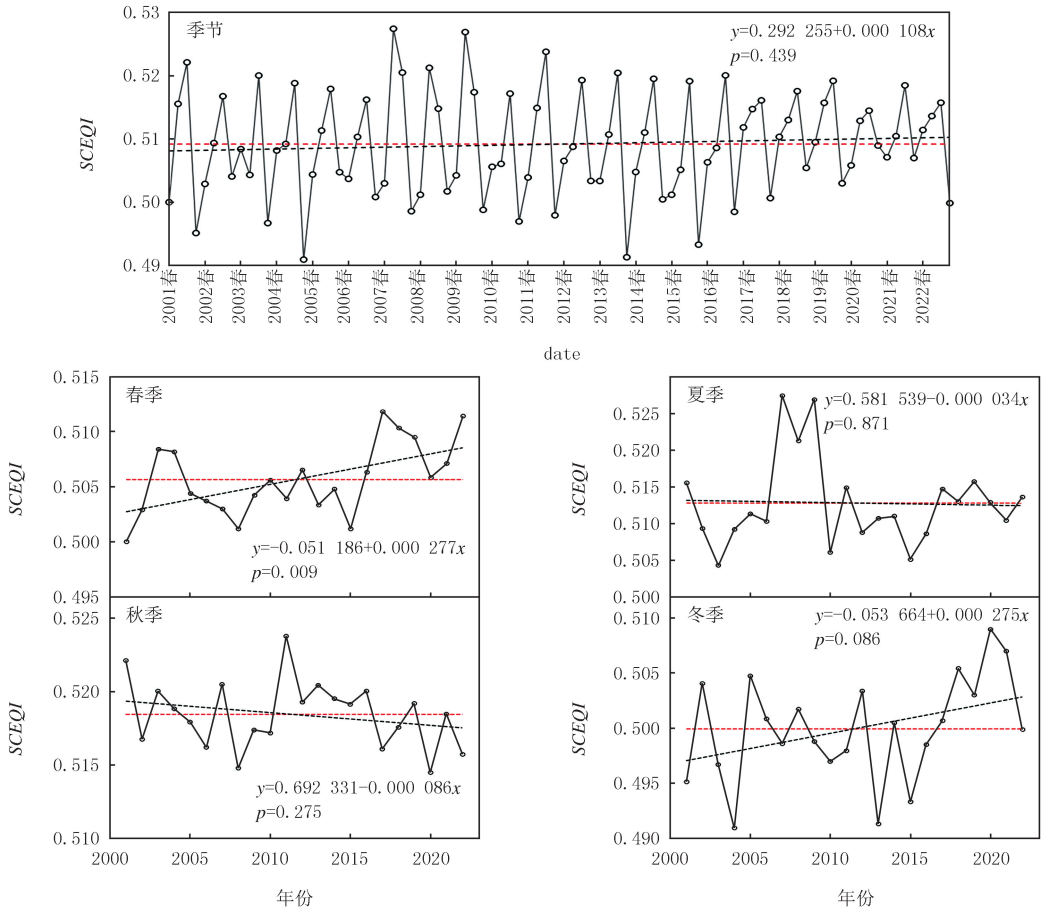


图5 2001-2022年黄河流域SCEQI季节折线图

Fig. 5 Seasonal line chart of SCEQI in the Yellow River Basin from 2001 to 2022

2001—2022年黄河流域的SCEQI的月值变化趋势(附录图S4).SCEQI在0.48到0.54之间波动,其中1月、12月、3月、5月的综合生态环境质量呈增长趋势,表明黄河流域生态环境在该时期内呈改善趋势;6月、9月呈下降趋势,表明生态环境在该时期内呈退化趋势.

3.2 黄河流域生态环境时空演变特征分析

根据 $SCEQI$ 的实际情况,将 S_{L_SCEQI} 值大于 0.001 9 的区域划分为改善区域, S_{L_SCEQI} 值小于 -0.001 9 的区域划分为退化区域,介于 -0.001 9 和 0.001 9 之间的区域划分为稳定不变.将 Mann-Kendall 检验在 0.05 置信水平上的显著性检验成果划分为显著变化($Z > 1.96$ 或 $Z < -1.9$)和不显著变化($-1.96 \leq Z \leq 1.96$).结合 Theil-Sen's slope 和 Mann-Kendall 结果,将 $SCEQI$ 的变化趋势分为显著改善、轻微改善、稳定不变、轻微退化和显著退化 5 类,分类标准见附录表 S2.

3.2.1 年时空演变分析

图 6 展示了黄河流域 2001—2022 年生态环境的空演变空间分布图.空间上,显著改善区集中分布在晋中陕北甘东高原的东部、晋南关中盆地的西部,占研究区总面积的 22.22%;显著退化区域集中分布在黄河上游的青南高原宽谷、果洛那曲高原、青东祁连山地,占研究区总面积的 16.66%;轻微改善区域零星分布在显著改善区周边,仅

占研究区总面积的 0.75%;轻微退化区零星分布在显著退化区域周边,占研究区总面积的 2.36%;稳定不变区域集中分布内蒙古高原、晋中陕北甘东高原西部、晋南关中盆地南部以及黄河下游河道地区,占研究区总面积的 58.02%.

3.2.2 季节性时空演变分析

空间上,黄河流域 2001—2022 年季节生态环境时空演变特征整体和年度空间演变特征一致,但不同季节具有明显的差异(附录图 S5).季节上,4 个季节流域的西部青南高原、果洛那曲丘状高原以及青东祁连山地均显著退化,晋中陕北甘东东部、晋南关中盆地南部均显著改善.晋南关中盆地西北部夏季显著改善,其他季节均未发生明显变化;内蒙古高原西部夏季显著退化明显,其他季节以稳定不变为主.各季变化趋势面积见附录表 S3.

3.2.3 月时空演变分析

空间上,黄河流域 2001—2022 年月度生态环境时空演变特征整体与年度空间演变特征一致,1、5、6、7、8、9 月表现出西北部退化趋势高于东部(附录图 S6),4 月南部的关中、汉中盆地发生显著退化.

3.3 黄河流域生态环境质量空间未来演变趋势分析

图 7 为研究区 HI 指数及未来变化趋势预测图,均值为 0.835,其中 HI 大于 0.5 的区域占研究区面积的 99.7%,小于 0.5 的占 0.3%,说明未来黄河流域将整体延续了现存的变化趋势.结合研究区 2001—2022 年的 $SCEQI$ 变化趋势 S_L 和 HI 值将 $SCEQI$ 的未来变化趋势分为持续改善、持续退化、稳定不变、退化转改善 4 类,分别占研究区总面积的 23.21%、19.05%、57.45%、0.29%.空间上,黄河流域生态环境未来变化趋势以稳定不变为主,集中分布在研究区的北部的内蒙古高原、晋中陕北甘东高原西部、华北山地丘陵地区;未来持续退化区域集中在黄河流域源头的青南高原宽谷、果洛那曲丘状高原、青东祁连山地,以及下游河道华北平原地区;未来持续改善区域集中在晋中陕北甘东高原东部,未来退化转改善区域零星分布在内蒙古高原西部.

4 讨论

当前遥感生态定量研究多以年或多年为时间单位,鲜少以季或月为时间步长的长序列的生态环境定量测算,致使对生态过程的动态变化理解不够全面^[24],降低了生态波动和突发事件的敏感性,限制了研究结果

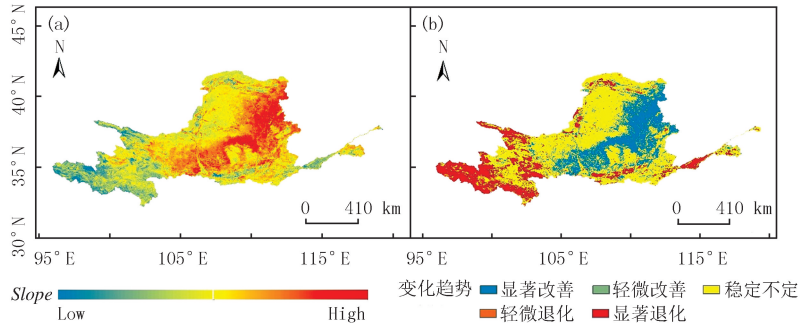


图6 年度生态环境时空演变特征

Fig.6 Spatiotemporal evolution characteristics of the annual ecological environment

的精细化程度和实用性^[25].本文针对 RSEI 模型在自动化应用中存在的问题,从数据源、指标去量纲方法、指标耦合方法等多方面进行改进,构建了一个泛化的生态环境质量定量测算模型 SCEQI,并以黄河流域为例,分别从年、季、月 3 个时间尺度分析了黄河流域 2001—2022 年的生态环境质量空间分布、演变规律、未来变化趋势,实现了长时序、高频率的生态环境的精细化研究.

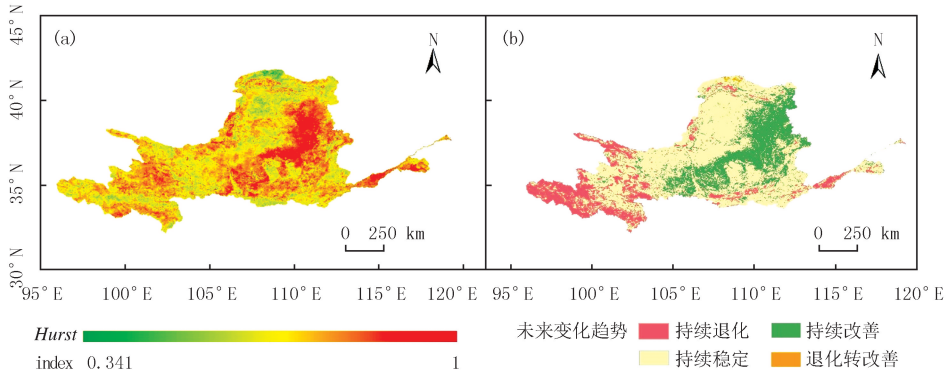


图7 黄河流域生态环境Hurst index (HI) 及未来变化趋势预测

Fig.7 Hurst index (HI) of the ecological environment in the Yellow River Basin and prediction of Future Changing trends

研究结果中黄河流域年生态环境质量空间分布及变化趋势与张京新等^[26]、杨泽康等^[27]、陈芳淼等^[28]基本一致,但本研究更精细地刻画了多时间尺度生态环境状况及其变化规律,实现了季节性、月度的生态环境质量评价,可为生态环境影响因子的作用机制机理研究提供创新方法和科学数据支撑.此外,细粒度的生态环境质量能够刻画区域生态环境的微观变化,互相印证生态系统的物候特征^[4-5].

然而,本研究虽实现了黄河流域多尺度长时序的生态环境研究,在现有研究基础上显著提升了研究的时间精度,但沿用 RSEI 原有 4 个自然指标,计算结果仅能反映自然环境的生态状况;其次,不同地理条件下生态环境的影响因素并不相同,本研究并未针对黄河流域建立适宜该区域的生态环境指标体系;此外,生态环境是复杂指标综合作用的结果,这些作用可能不全为线性,而 PCA 指标耦合方法在处理非线性关系时具有局限性^[29],导致结果可能具有不确定性.因此后续研究应聚焦构建具有地理适宜性的生态环境评价指标体系和探索更复杂的耦合方法,深入研究各生态因子对生态环境的作用方式和机理.

5 结 论

本文基于 2001—2022 年黄河流域的 MODIS 遥感数据集,构建了一个泛化的生态环境自动化评价模型 SCEQI,并采用趋势分析、HI 指数与 R/S 分析等方法,分析了黄河流域生态环境状况及其演变特征和未来趋势,主要结论如下:

(1)黄河流域多尺度时间序列生态环境研究验证了 SCEQI 模型开展多尺度长序列研究的可行性,整体结果和其他学者研究的一致性验证了模型的可靠性,季、月尺度的长时序研究验证了模型的时序精细化解析能力.

(2)黄河流域生态环境质量具有显著的时空异质性.2001—2022 年 SCEQI 在年、季、月尺度整体上均呈现明显的南优北劣的分异特征,表现出显著的空间异质性,但冬季生态环境质量空间上呈现南劣北优的趋势,表现出明显的时间异质性.

(3)黄河流域生态环境状况在不同时间尺度的整体趋势均呈现缓慢改善态势.但不同时间尺度的测算结果仍具有明显差异,季节上,春、冬季的生态环境呈改善状态,夏季和秋季呈恶化趋势;月度上,1 月的生态环境最差,9 月的生态环境最优,月值曲线先上升后下降,呈抛物线形状.

(4)黄河流域未来生态环境变化情况整体延续现在的变化趋势,其中西部青南高原宽谷、果洛那曲高原、青东祁连山地的生态环境较差区域呈持续退化态势;晋中陕北甘东东部、晋南关中盆地南部生态环境较好区域呈持续改善态势;其余地区无明显变化或者呈轻微变化趋势.

附录见电子版(DOI:10.16366/j.cnki.1000-2367.2025.12.23.0002).

参 考 文 献

- [1] NIU K Y, HE W, QIU L Y. Symbiosis coordination between industrial development and ecological environment for sustainable development: Theory and evidence[J]. *Sustainable Development*, 2023, 31(4): 3052-3069.
- [2] 马林, 梁勇, 张雅芹, 等. 基于 RSEI 的山东省不同土地覆盖区生态环境质量变化特征及驱动因素[J]. *水土保持研究*, 2024, 31(2): 389-400.
MA L, LIANG Y, ZHANG Y Q, et al. Spatiotemporal change and driving factors of the eco-environment quality of different land covers in Shandong Province based on RSEI[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2024, 31(2): 389-400.
- [3] 苗得雨, 周孝德, 程文, 等. 中国环境污染现状分析及防治管理措施[J]. *水利科技与经济*, 2006, 12(11): 751-753.
MIAO D Y, ZHOU X D, CHENG W, et al. The present situation analysis of environmental pollution and its control management in China [J]. *Water Conservancy Science and Technology and Economy*, 2006, 12(11): 751-753.
- [4] 张静, 杨丽萍, 贡恩军, 等. 基于谷歌地球引擎和改进型遥感生态指数的西安市生态环境质量动态监测[J]. *生态学报*, 2023, 43(5): 2114-2127.
ZHANG J, YANG L P, GONG E J, et al. Dynamic monitoring of eco-environmental quality in Xi'an based on GEE and adjusted RSEI[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(5): 2114-2127.
- [5] 王胜鹏, 乔花芳, 冯娟, 等. 黄河流域旅游生态效率时空演化及其与旅游经济互动响应[J]. *经济地理*, 2020, 40(5): 81-89.
WANG S P, QIAO H F, FENG J, et al. The spatio-temporal evolution of tourism eco-efficiency in the Yellow River Basin and its interactive response with tourism economy development level[J]. *Economic Geography*, 2020, 40(5): 81-89.
- [6] 徐涵秋. 城市遥感生态指数的创建及其应用[J]. *生态学报*, 2013, 33(24): 7853-7862.
XU H Q. A remote sensing urban ecological index and its application[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(24): 7853-7862.
- [7] YUAN B D, FU L N, ZOU Y A, et al. Spatiotemporal change detection of ecological quality and the associated affecting factors in Dongting Lake Basin, based on RSEI[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 302: 126995.
- [8] 徐涵秋. 区域生态环境变化的遥感评价指数[J]. *中国环境科学*, 2013, 33(5): 889-897.
XU H Q. A remote sensing index for assessment of regional ecological changes[J]. *China Environmental Science*, 2013, 33(5): 889-897.
- [9] 中华人民共和国环境保护部. 生态环境状况评价技术规范: HJ 192-2015[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2015.
- [10] LIU Y, DANG C Y, YUE H, et al. Comparison between modified remote sensing ecological index and RSEI[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2022, 26(4): 683-697.
- [11] YANG X Y, MENG F, FU P J, et al. Time-frequency optimization of RSEI: a case study of Yangtze River Basin[J]. *Ecological Indicators*, 2022, 141: 109080.
- [12] 陈宜欣, 宁晓刚, 张翰超, 等. 遥感生态指数(RSEI)模型及应用综述[J]. *自然资源遥感*, 2024, 36(3): 28-40.
CHEN Y X, NING X G, ZHANG H C, et al. Remote sensing ecological index(RSEI) model and its applications: a review[J]. *Remote Sensing for Natural Resources*, 2024, 36(3): 28-40.
- [13] 陈芳森, 黄慧萍, 杨光, 等. 基于遥感生态指数的黄河流域生态环境质量变化及影响因素分析[J]. *中国沙漠*, 2023, 43(4): 252-262.
CHEN F M, HUANG H P, YANG G, et al. Research on the dynamic change of the ecological environment and its influencing factors in the Yellow River Basin based on Remote Sensing Ecological Index[J]. *Journal of Desert Research*, 2023, 43(4): 252-262.
- [14] 杨江燕, 吴田, 潘肖燕, 等. 基于遥感生态指数的雄安新区生态质量评估[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(1): 277-284.
YANG J Y, WU T, PAN X Y, et al. Ecological quality assessment of Xiongan New Area based on remote sensing ecological index[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(1): 277-284.
- [15] LI N, WANG J Y. Comprehensive eco-environment quality index model with spatiotemporal characteristics [J]. *Sensors*, 2022, 22(24): 9635.
- [16] 尹传鑫. 基于 MODIS 的黄河流域生态环境质量演变及驱动力分析[D]. 郑州: 郑州大学, 2022.
YIN C X. Evolution and driving force analysis of ecological environment quality based on MODIS data in the yellow river basin[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2022.
- [17] 王剑, 管瑶, 贺兴宏, 等. 2000-2021 年图木舒克市生态环境质量动态监测与评价[J]. *干旱区地理*, 2024, 47(3): 465-473.
WANG J, GUAN Y, HE X H, et al. Dynamic monitoring and evaluation of ecological environment quality in Tumshuk City from 2000 to 2021[J]. *Arid Land Geography*, 2024, 47(3): 465-473.
- [18] RIKIMARU A, ROY P S, MIYATAKE S. Tropical forest cover density mapping[J]. *Tropical Ecology*, 2002, 43: 39-47.
- [19] XU H. A new index for delineating built - up land features in satellite imagery[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2008, 29(14): 4269-4276.

- [20] JIMENEZ-MUNOZ J C, CRISTOBAL J, SOBRINO J A, et al. Revision of the single-channel algorithm for land surface temperature retrieval from landsat thermal-infrared data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(1): 339-349.
- [21] SOBRINO J A, JIMENEZ-MUNOZ J C, SORIA G, et al. Land surface emissivity retrieval from different VNIR and TIR sensors[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(2): 316-327.
- [22] 易平涛, 张丹宁, 郭亚军, 等. 动态综合评价中的无量纲化方法[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2009, 30(6): 889-892.
YI P T, ZHANG D N, GUO Y J, et al. Study on dimensionless methods in dynamic comprehensive evaluation[J]. *Journal of Northeastern University(Natural Science)*, 2009, 30(6): 889-892.
- [23] 宗慧琳, 张晓伦, 袁希平, 等. 利用 GEE 进行 1990-2022 年小江流域生态环境质量时空格局与演变趋势分析[J]. *环境科学*, 2024, 45(7): 4122-4136.
ZONG H L, ZHANG X L, YUAN X P, et al. Xiaojiang river basin ecological environmental quality spatiotemporal pattern and evolutionary trend analysis using GEE from 1990 to 2022[J]. *Environmental Science*, 2024, 45(7): 4122-4136.
- [24] YANG H H, YU J, XU W Z, et al. Long-time series ecological environment quality monitoring and cause analysis in the Dianchi Lake Basin, China[J]. *Ecological Indicators*, 2023, 148: 110084.
- [25] 汪东川, 陈星, 孙志超, 等. 格尔木长时间序列遥感生态指数变化监测[J]. *生态学报*, 2022, 42(14): 5922-5933.
WANG D C, CHEN X, SUN Z C, et al. Monitoring of changes in the ecological index of long-time sequence Remote Sensing in Golmud, Qinghai Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(14): 5922-5933.
- [26] 张京新, 谷雨鑫, 沈佳琦, 等. 黄河流域生态环境质量时空变化及驱动因素分析[J]. *环境科学*, 2025, 46(2): 956-971.
ZHANG J X, GU Y X, SHEN J Q, et al. Analysis of spatiotemporal changes and driving factors of ecological environment quality in the Yellow River Basin[J]. *Environmental Science*, 2025, 46(2): 956-971.
- [27] 杨泽康, 田佳, 李万源, 等. 黄河流域生态环境质量时空格局与演变趋势[J]. *生态学报*, 2021, 41(19): 7627-7636.
YANG Z K, TIAN J, LI W Y, et al. Spatio-temporal pattern and evolution trend of ecological environment quality in the Yellow River Basin[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(19): 7627-7636.
- [28] 陈芳森, 黄慧萍, 杨光, 等. 基于遥感生态指数的黄河流域生态环境质量变化及影响因素分析[J]. *中国沙漠*, 2023, 43(4): 252-262.
CHEN F M, HUANG H P, YANG G, et al. Research on the dynamic change of the ecological environment and its influencing factors in the Yellow River Basin based on Remote Sensing Ecological Index[J]. *Journal of Desert Research*, 2023, 43(4): 252-262.
- [29] 刘英, 党超亚, 岳辉, 等. 改进型遥感生态指数与 RSEI 的对比分析[J]. *遥感学报*, 2022, 26(4): 683-697.
LIU Y, DANG C Y, YUE H, et al. Comparison between modified remote sensing ecological index and RSEI[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2022, 26(4): 683-697.

Multi-scale time series ecological environment assessment in the Yellow River Basin

Li Ning, Yuan Yuanyuan, Li Dingyu, Liu Wenlu, Zhang Jie, Pan Qi, Guo Jianzhong, Wang Jiayao

(School of Remote Sensing and Spatial Information Engineering, Faculty of Geographical Science and Engineering;
Henan Institute of Spatio-temporal Big Data Industry Technology, Henan University, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: Grasping the spatial differentiation characteristics and dynamic change patterns of ecological environment quality in the Yellow River Basin across multiple temporal scales is key to achieving coordinated regional economic development and ecological coexistence. However, constrained by the current level of automation in remote sensing ecological environment quality assessment models, existing studies are still limited to coarse annual time units. Based on the issues of the RSEI model, this paper focuses on the ecological environment assessment needs of multi-temporal scale sequences, constructs a spatiotemporal ecological environment quality index model, and takes the Yellow River Basin as an example to conduct a study of ecological environment quality on annual, seasonal and monthly scales, verifying the feasibility and reliability of the model. The results show that the ecological environment quality in the Yellow River Basin has significant spatiotemporal heterogeneity, with a spatial pattern generally showing higher values in the south and lower in the north, but a trend of lower values in the south and higher in the north occurs in winter; temporally, annual, seasonal, and monthly scales all show a slow improvement trend, with spring and winter showing improvement, summer and autumn showing deterioration, and the improvement trend being greater than the deterioration trend; the ecological environment is worst in January and best in September, with the monthly average ecological environment quality curve forming a parabolic shape.

Keywords: ecological environment; Yellow River Basin; multi-scale; time series

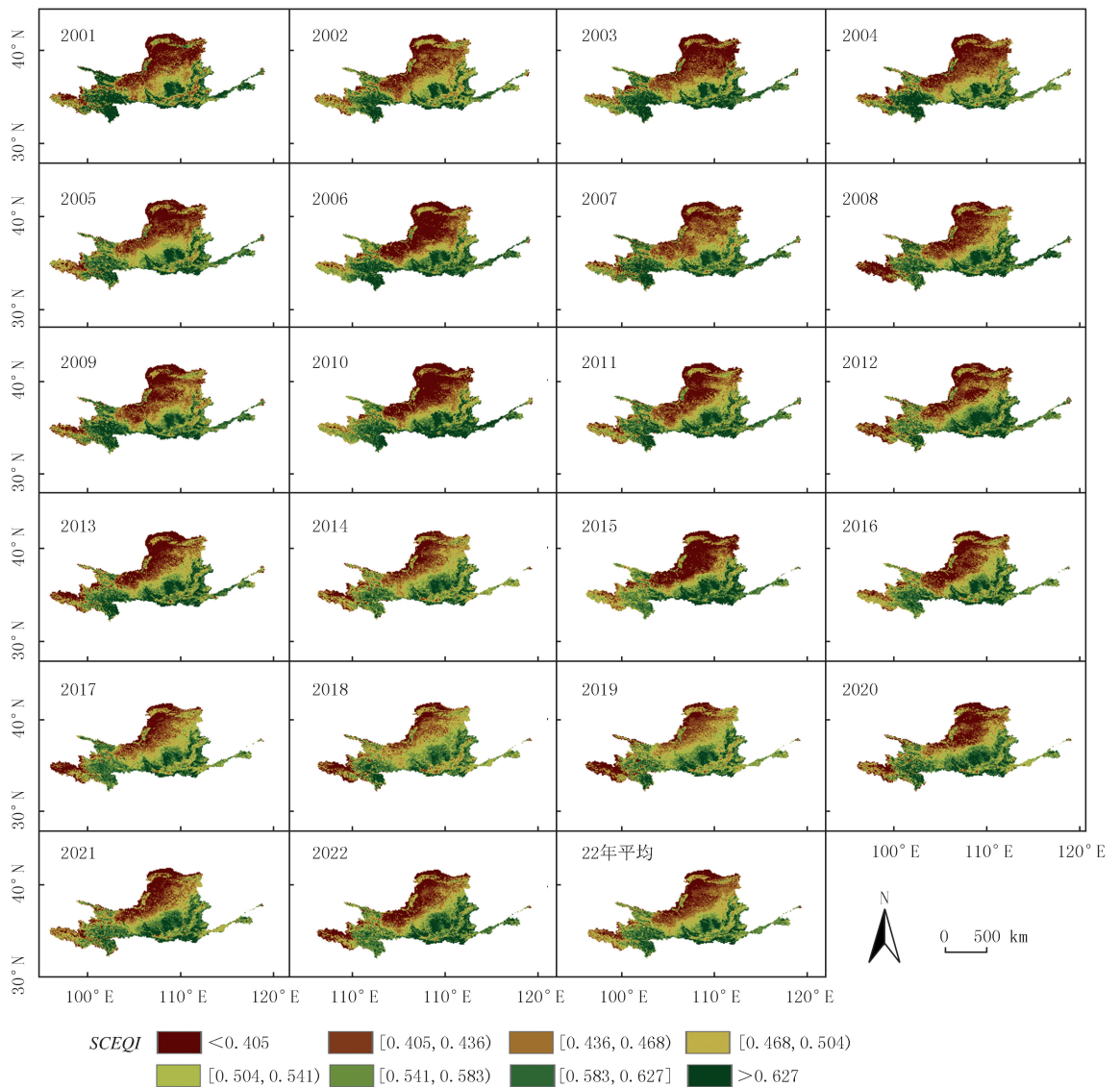
[责任编辑 刘洋 赵晓华]

附录

表 S1 生态环境指标反演计算公式

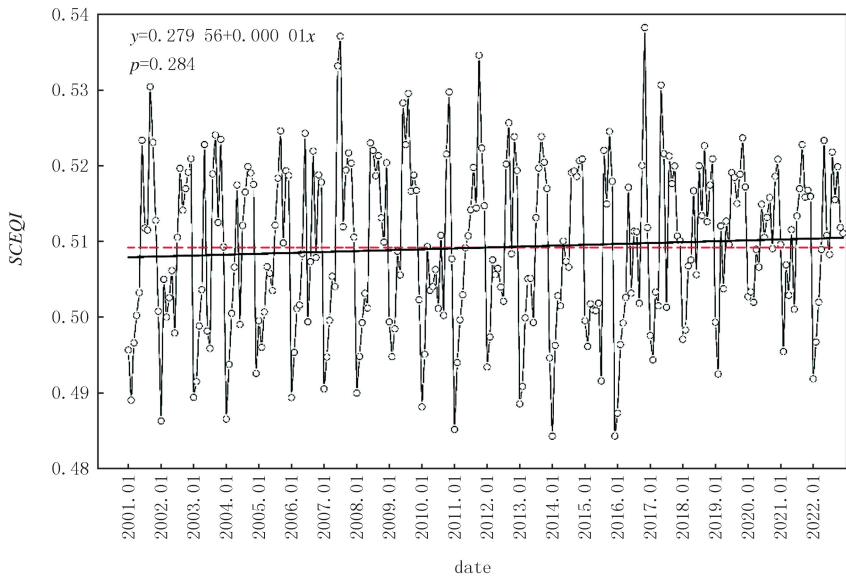
Tab. S1 Inversion calculation formulas of ecological environment indicators

指标	计算公式
NDVI	$NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red)$
NDBSI	$SI = \frac{(Red + SWIR1) - (NIR + Green)}{(Red + SWIR1) + (NIR + Green)}, IBI = \frac{2 * \frac{NIR}{NIR + Red} (\frac{Red}{Red + Green} + \frac{Blue}{Blue + NIR})}{2 * \frac{NIR}{NIR + Red} + (\frac{Red}{Red + Green} + \frac{Blue}{Blue + NIR})}, NDBSI = (SI + IBI) / 2$
LST	$LST = \gamma [\frac{1}{\epsilon_i} (\phi_1 L_i + \phi_2) + \phi_3] + \delta$
Wet	$Wet = +0.1147 * Red + 0.2489 * NIR1 + 0.2408 * Blue + 0.3132 * Green - 0.3122 * NIR2 - 0.6416 * SWIR1 - 0.5087$



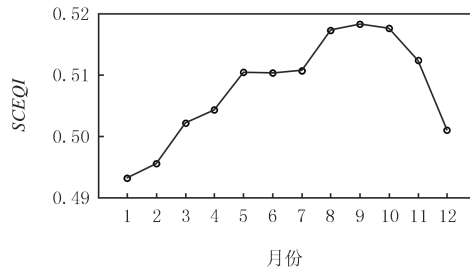
图S1 2001-2022年黄河流域年际SCEQI空间分布

Fig.S1 Spatial distribution of interannual SCEQI in the Yellow River Basin from 2001 to 2022



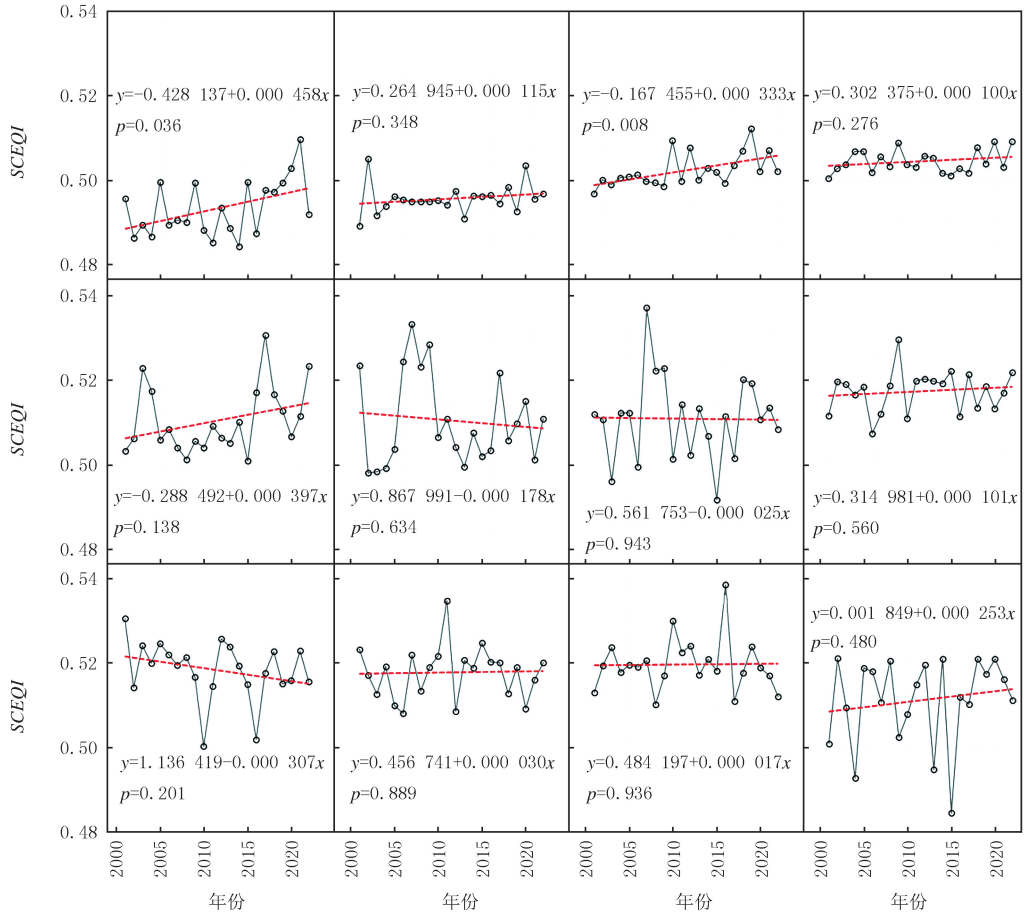
图S2 黄河流域2001-2022年月SCEQI折线图

Fig.S2 Monthly SCEQI line chart of the Yellow River Basin from 2001 to 2022



图S3 黄河流域2001-2022年月均值SCEQI折线图

Fig.S3 Line chart of monthly mean SCEQI in the Yellow River Basin from 2001 to 2022



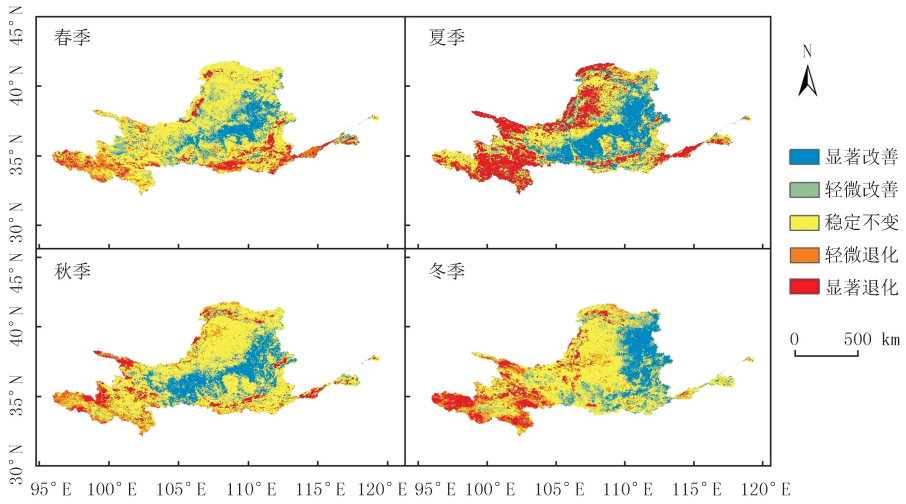
图S4 黄河流域2001-2022年逐月SCEQI折线图

Fig.S4 Monthly variation line chart of *SCEQI* in the Yellow River Basin from 2001 to 2022

表 S2 2001—2022 黄河流域 *SCEQI* 变化趋势分类标准

Tab. S2 Classification standards for *SCEQI* change trends in the Yellow River Basin from 2001 to 2022

$S_{L\text{SCEQI}}$	Z 值	趋势分类
>0.0019	>1.96 或 <-1.96	显著改善
>0.0019	$[-1.96, 1.96]$	轻微改善
$[-0.0019, 0.0019]$	$[-1.96, 1.96]$	稳定不变
<0.0019	$[-1.96, 1.96]$	轻微退化
<-0.0019	>1.96 或 <-1.96	显著退化



图S5 季节生态环境时空演变特征

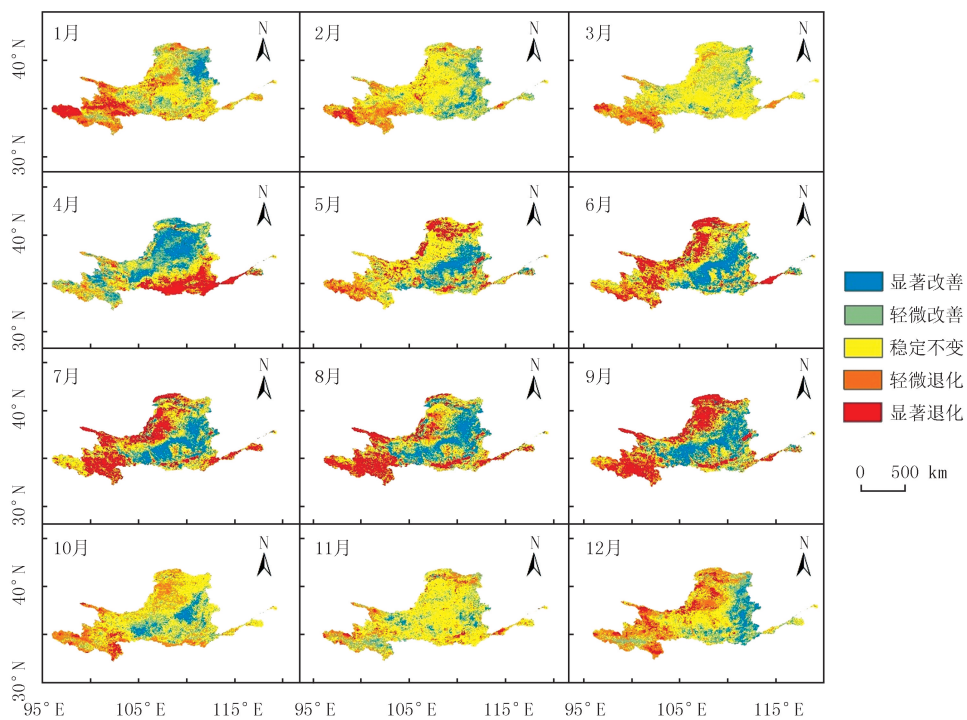
Fig.S5 Spatiotemporal evolution characteristics of the seasonal ecological environment

表 S3 2001—2022 年黄河流域季节性变化趋势面积

Tab. S3 Areas of seasonal change trends in the Yellow River Basin from 2001 to 2022

趋势变化	春	夏	秋	冬
显著退化	14.08	24.95	18.99	15.68
轻微退化	8.69	4.62	4.23	9.76
稳定不变	57.16	38.19	57.20	50.44
轻微改善	12.17	5.47	11.75	14.42
显著改善	7.90	26.76	7.83	9.69

%



图S6 月度生态环境时空演变特征

Fig.S6 Spatiotemporal evolution characteristics of the monthly ecological environment