

2001—2020 年黄土高原生态环境质量对 气候及土地利用变化的响应

张 洵¹, 岑云峰¹, 高照良^{1,2}, 李永红^{1,2}, 孙贯芳¹, 刘文博¹

(1.西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2.中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: [目的] 分析黄土高原生态环境质量(EEQ)时空变化特征及其对气候与土地利用变化的响应情况,为黄土高原制定合理的生态保护措施及土地开发提供一定的依据,以实现其高质量发展。[方法] 基于改进的遥感生态环境指数及气候、土地利用等数据,从像元尺度出发,利用 Theil-Sen 趋势分析方法探究了黄土高原 2001—2020 年 EEQ 的时空变化特征,同时采用多元回归及叠加分析等手段研究了 EEQ 对气候变化及土地利用转移的响应情况。[结果] ①研究时段内,黄土高原 EEQ 呈现小幅度波动上升、下降、再上升趋势,相较于 2001—2010 年,2010—2020 年波动有所放缓;空间上,EEQ 总体质量一般,呈“东南高,西北低”的格局,2010—2020 年相较于 2001—2010 年而言,显著增加的区域由东南部向中北部区域转移,显著下降的区域由西北部向东部转移。②降水量对 EEQ 整体呈正面效应,在 2001—2007 年期间呈现显著的正相关关系,后期由于其他因素的干扰驱动力有所下降,在植被覆盖较少的区域则影响较小;气温在大部分区域与 EEQ 呈负相关,相较于降水量而言影响较小,在城市密集地区影响较大。③研究时段内,大量的耕地向草地,草地向林地及未利用地向草地的转移是研究区内 EEQ 呈稳中向好格局的主要驱动力,而耕地向建设用地,草地向未利用地的转移是引起 EEQ 下降的重要因素。[结论] 黄土高原的 EEQ 受到气候及土地利用的双重影响。降水对 EEQ 的影响大于温度,土地利用转变对于 EEQ 整体呈现正面效应,具有空间异质性,对区域内城市群区域生态保护应予以重视。

关键词: 生态环境质量; 黄土高原; 气候变化; 土地利用

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)03-0234-11

中图分类号: X87, X171.1

文献参数: 张洵, 岑云峰, 高照良, 等. 2001—2020 年黄土高原生态环境质量对气候及土地利用变化的响应[J]. 水土保持通报, 2023, 43(3): 234-244. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.03.028; Zhang Xun, Cen Yunfeng, Gao Zhaoliang, et al. Response of eco-environmental quality to climate change and land use in Loess Plateau from 2000 to 2020 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(3): 234-244.

Response of Eco-environmental Quality to Climate Change and Land Use in Loess Plateau from 2000 to 2020

Zhang Xun¹, Cen Yunfeng¹, Gao Zhaoliang^{1,2}, Li Yonghong^{1,2}, Sun Guanfang¹, Liu Wenbo¹

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University,

Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese

Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] The spatial and temporal changes of ecological environmental quality (EEQ) in response to climate and land use changes on the Loess Plateau were analyzed in order to provide a basis for the formulation of reasonable ecological protection measures and land development on the Loess Plateau that will promote high-quality development. [Methods] Based on an improved remote sensing ecological environmental index and climate and land use data, we determined the spatial and temporal characteristics of EEQ on the Loess Plateau from 2001 to 2020 using Theil-Sen trend analysis at the image pixel scale. [Results] ① During the study period, EEQ values on the Loess Plateau showed small fluctuations of rising, falling, and rising, and the fluctuations slowed down from 2010 to 2020 compared with the time period of 2001 to 2010. EEQ

收稿日期: 2022-09-18

修回日期: 2022-11-12

资助项目: 十三五国家重点研发计划“高原沟壑区固沟保塬生态防护”(2016YFC0501706-02); 国家自然科学基金项目(41671283)

第一作者: 张洵(1999—), 男(汉族), 江苏省盐城市人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持与生态环境。Email: zhangxun0809@nwfufu.edu.cn。

通信作者: 高照良(1969—), 男(汉族), 河南灵宝人, 博士, 研究员, 主要从事水土保持方向研究。Email: gzl@ms.iswc.ac.cn。

values generally showed a spatial pattern of “higher in the southeast and lower in the northwest”. Compared with the period from 2001 to 2010, the period of 2010 to 2020 exhibited an area of significant increase in EEQ that shifted from the southeast to the north-central region, and an area of significant decrease in EEQ that shifted from the northwest to the east. ② Precipitation had an overall positive effect on EEQ, with a significant positive correlation from 2001 to 2007. Due to the interference of other factors in the later period, the driving force increased, and the influence was small in areas with less vegetation coverage. Temperature had a negative effect on EEQ in most areas, with less effect compared with precipitation, and greater effect in dense urban areas. ③ During the study period, large transfers of cropland to grassland, grassland to woodland, and unused land to grassland were the main driving forces for the steady to good pattern of EEQ in the study area, while the transfer of cropland to construction land and of grassland to unused land were important factors causing the decline of EEQ. [Conclusion] EEQ on the Loess Plateau was influenced by both climate and land use. The influence of precipitation on EEQ was greater than that of temperature, and land use shifts generally showed positive effects on EEQ but with spatial heterogeneity. Greater attention should be given to regional ecological conservation in urban clusters within the region in the future.

Keywords: ecological environmental quality; Loess Plateau; climate change; land use

近几十年以来,随着气候变化和人类活动的不断加剧,生态环境质量同自然与人类的关系变得尤为复杂。实现良好的生态环境是实现可持续发展的重要前提^[1],也是推进中国生态文明建设进程的基础条件^[2]。土地利用/土地覆盖变化(land-use and land-cover change, LUCC)是地表系统最突出的指标之一,能够反映人类活动,被认为是全球生态环境变化的主要原因^[3]。20 世纪以来,西北地区经济的发展引起了土地利用的深刻转型^[4],生态的脆弱性及不稳定性也进一步加剧,具有较强的空间异质性^[5]。研究表明 1995—2015 年中国生态环境质量变化重心持续向西部地区转移,其变化的热点集中分布在陕西、甘肃及内蒙古等区域^[6]。黄土高原作为中国水土保持与生态建设的重点区域^[7],近几十年来气候变化波动剧烈^[8],人类活动导致土地利用频繁变化^[9]。因此,监测黄土高原地区生态环境演变状况、研究生态环境变化对气候变化及土地利用的响应并为此做出相应对策是目前亟待解决的问题。

有关生态环境质量的评估目前已存在众多评价体系,多以数学模型为基础。如生态环境部部于 2015 年颁布的基于植被覆盖度、生物丰度、土地胁迫指数等指标构建的生态环境状况指数(ecological index, EI)。徐涵秋^[10]于 2013 年提出的基于遥感技术,耦合了反演得到的植被指数(NDVI)、湿度指数(WET)、地表热度(LST)和建筑物—裸土指数(NDBSI)的遥感生态指数(remote sensing ecological index, RSEI),从而实现了对区域生态环境时空分布及变化趋势预测的评价,较好地解决了 EI 指数获取难度大、大规模应用困难的问题。目前国内学者基于 RSEI 针对不同区域开展了一系列研究,如华

东及华中^[11-14]、东北^[15-16]、西北地区^[17-18],黄河流域^[1,5,19-20]、长江中下游^[21],以及全国尺度^[22-23]等。然而,单纯基于以上 4 个指标的 RSEI 对于某些研究区域的评估具有局限性,在某些情况下相较于标准化的 EI 指数来说存在一定的偏差现象。由此一些研究者在 RSEI 的基础上构建出了改进的遥感生态指数模型:如王杰等在原有的基础上附加了盐度(SI-T)及土地退化指标构建了适用于干旱区的 ARESI 模型^[24],朱冬雨等^[25]通过移动窗口细分评价区域构建出了适用于矿区等环境复杂区域的 MW-RSEI 模型,付杰等^[26]在 RSEI 的基础上增加了土地利用指标(LUS)、坡度指标(slope)等构建了 IRSEI 模型用以评估海南岛,张壑等^[27],Xu Dong^[28]针对生态系统功能服务构建了 RSEI-2 模型来评价中国的生态环境质量,并在部分区域生态环境研究得到了一定的验证^[29]。以往针对黄土高原区域的研究主要集中在植被覆盖度(NDVI)等指标^[30-32],有关生态环境质量的研究仍然很少且以定性的描述为主^[33],对气候或土地利用变化的影响的关注较少。

因此,本研究采用基于 RSEI-2 模型,构建能够反映生境环境质量的生态环境指数,并结合降水气温及土地利用等数据,以黄土高原为研究区域,采用 Theil-Sen 趋势分析、逐像元多元回归等方法,分析 2001—2020 年黄土高原生态环境质量的变化特征及其对气候变化及土地利用的响应,旨在为黄土高原生态环境的制定合理的生态保护措施及实现高质量发展提供一定的科学依据。

1 研究区概况

黄土高原地区(33°—41°N, 100°—114°E)位于中

国北太行山以西,乌鞘岭以东,秦岭以北,长城以南的地区,面积约有 $6.40 \times 10^5 \text{ km}^2$,包括山西、青海、陕西、甘肃等省(自治区)全部或部分区域。该地区位于沿海向内陆、平原向高原过渡地带,自南而北兼跨暖温带、中温带两个热量带,自东向西横贯半湿润、半干旱两个干湿区^[34]。高原东部、南部属于暖温带半湿润区,中部属于暖温带半干旱区,西部和北部属于中温带半干旱区,具有典型的大陆季风气候特征^[23]。全年总雨量少,65%的雨水集中在夏季,降水的强度大;高原日照充足,年均气温在 $8 \sim 14 \text{ }^\circ\text{C}$ 。由于气候差异大、地貌单元复杂,该地区是中国生态环境最脆弱的地区之一,主要表现在径流量减少、土壤侵蚀剧烈、土地荒漠化严重、植被退化等方面^[7]。

2 数据与方法

2.1 研究数据来源及预处理

本研究使用的数据主要包括中国高分辨率生态环境质量数据集^[27](CHEQ)、Landsat 8 卫星数据、降雨数据、气温数据、Yang Jie 等^[35]基于 Landset 卫星构建出的中国年土地覆盖 (CLCD)数据集、数字高程数据 (DEM)、省边界及河网数据,具体信息见表 1。其中遥感影像直接来源于 Google Earth Engine 所计算出的 Landsat 8 (OLI)地表反射率数据产品 (surface reflectance, SR),该数据产品已经过几何校正、辐射校正和大气校正。基于 GEE 平台进行编程 (JavaScript),筛选合适时间并使用云掩膜算法去云,并完成裁剪。

表 1 数据源详细说明
Table 1 Detailed description of data sources

数据名	空间分辨率	时间分辨率	时间范围	数据来源
中国高分辨率生态环境质量(CHEQ)	1 000 m	年	2001—2019 年	文献[27] https://zenodo.org/record/5500805
陆地资源卫星 8(Landsat 8)	30 m	16 d	2020 年	美国航空航天局 https://landsat.gsfc.nasa.gov
中国年土地覆盖数据(CLCD)	30 m	年	2001,2010,2019 年	文献[33] https://zenodo.org/record/4417810
降雨数据	1 000 m	月	2001—2020 年	国家地球系统科学数据中心 http://loess.geodata.cn
气温数据	1 000 m	月	2001—2020 年	国家地球系统科学数据中心 http://loess.geodata.cn
数字高程(DEM)	30 m	2015	2015 年	中国科学院地理科学与资源研究所 https://www.resdc.cn
中国省边界、河网	1:1 000 000	2015	2015 年	中国科学院地理科学与资源研究所 https://www.resdc.cn

为了定量评价区域生态环境质量,参考 2015 年环境保护部开发并发布的生态环境质量指数(EI)模型。由于此数据源结果与 EI 结果高度一致^[28],评价指标采用中华人民共和国生态环境部于 2021 年颁布并实施的《全国生态状况调查评估技术规范——生态质量评估》(HJ1172-2021)推荐的评价指标定量评价区域生态环境质量,其具体分级标准见表 2。

2.2 研究方法

2.2.1 生态质量模型 (RSEI-2)的简介与构建 鉴于数据集中缺少 2020 年数据,本研究基于改进的遥感

生态指数模型^[10,28],选用表 3 中的 5 个指标在 ENVI 5.3 中进行归一化处理。

表 2 生态系统质量分级
Table 2 Ecosystem quality classification

级别	生态系统质量	描述
优	$\text{EQI} \geq 75$	生态系统质量为优
良	$55 \leq \text{EQI} < 75$	生态系统质量良好
中	$35 \leq \text{EQI} < 55$	生态系统质量为中等水平
低	$20 \leq \text{EQI} < 35$	生态系统质量较低
差	$\text{EQI} < 20$	生态系统质量较差

表 3 生态质量模型指标计算公式
Table 3 Calculation formula of ecological quality model index

指标	计算公式
绿度 (NDVI)	$\text{NDVI} = (\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{red}}) / (\rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{red}})$
湿度 (WET)	$\text{WET}_{\text{OLI}} = 0.151 \ 1\rho_{\text{blue}} + 0.197 \ 3\rho_{\text{green}} + 0.328 \ 3\rho_{\text{red}} + 0.340 \ 7\rho_{\text{NIR}} - 0.711 \ 7\rho_{\text{SWIR1}} - 0.455 \ 9\rho_{\text{SWIR2}}$
干度 (NDBSI)	$\text{IBI}_1 = 2\rho_{\text{SWIR2}} / (\rho_{\text{SWIR1}} + \rho_{\text{NIR}}) - [\rho_{\text{NIR}} / (\rho_{\text{red}} + \rho_{\text{NIR}}) + \rho_{\text{green}} / (\rho_{\text{SWIR1}} + \rho_{\text{green}})]$ $\text{IBI}_2 = 2\rho_{\text{SWIR2}} / (\rho_{\text{SWIR1}} + \rho_{\text{NIR}}) + [\rho_{\text{NIR}} / (\rho_{\text{red}} + \rho_{\text{NIR}}) + \rho_{\text{green}} / (\rho_{\text{SWIR1}} + \rho_{\text{green}})]$ $\text{SI} = [(\rho_{\text{SWIR1}} + \rho_{\text{red}}) - (\rho_{\text{blue}} + \rho_{\text{NIR}})] / [(\rho_{\text{SWIR1}} + \rho_{\text{red}}) + (\rho_{\text{blue}} + \rho_{\text{NIR}})]$
热度 (LST)	$\text{LST} = T / [1 + (\lambda T / \rho) \ln \epsilon] - 273.15$
生境指数 (HQI)	$\text{HQI} = \text{AHQI} \times (0.35 \times \text{forest} + 0.21 \times \text{Grassland} + 0.28 \times \text{water} + 0.11 \times \text{Cropland} + 0.04 \times \text{Built} + 0.01 \times \text{Unused}) / \text{Area}$

注: ρ_i 为各对应波段的地表反射率; T 为传感器处热度值; λ 为热红外波段中心波长; ρ 为常数; ϵ 为地表比辐射率。

并完成主成分分析(PCA),构建出该年的生态环境质量数据,公式如下:

$$RSEI-2 = \frac{PC1 - PC1_{\min}}{PC1_{\max} - PC1_{\min}} \quad (1)$$

$$PC1 = PCA(NDVI, WET, NDBSI, LST, HQI) \quad (2)$$

式中:RSEI-2 为改进遥感生态指数;PC1 为第一主成分;PC1_{min}为第一主成分的最小值;PC1_{max}为最大值。

2.2.2 Theil-Sen Median 与 Mann-Kendall 分析 本研究利用 Theil-Sen Median 方法进行生态环境质量(EEQ)变化趋势分析。Theil-Sen Median 分析又被称为 Sen 斜率估计,该方法是一种稳健的非参数统计的趋势计算方法,常被用于长时间序列数据的趋势分析^[36]。其公式如下:

$$\beta = \text{median} \left(\frac{x_j - x_k}{j - k} \right) \quad (3)$$

$$(j = 1, 2 \cdots 20; k = 1, 2 \cdots j - 1)$$

式中: β 为像元回归方程的斜率; x_j 与 x_k 为第 j 年与第 k 年的 EEQ 的平均值。

显著性检验采取 Mann-Kendall 检定法^[37]。它是一种非参数的统计方法,可利用连续资料间的大小关系来鉴定 EEQ 的变化趋势是否明显,可以处理序列中极值及资料缺漏的问题,其公式为:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i),$$

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1 & (x_j - x_i > 0) \\ 0 & (x_j - x_i = 0) \\ -1 & (x_j - x_i < 0) \end{cases} \quad (4)$$

式中: x_j 为时间序列中第 j 个数据值; n 为数据样本的长度,在本研究中为 20;sgn 为符号函数。

当 $n \geq 10$ 时,Mann-Kendall 检验统计值 S 近似正态分布且平均值为 0,其变异系数为:

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

由 Z 值来判断数据是否有显著性趋势,其公式为:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & (S > 0) \\ 0 & (S = 0) \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & (S < 0) \end{cases} \quad (6)$$

给定 95% 及 99% 置信水平 α ,当 $|Z| > Z_{1-\alpha/2}$ 时,便可以认为其在该水平上有显著的变化趋势;当 $|Z| < Z_{1-\alpha/2}$ 时,可以认为其在该水平并无显著的变化趋势。

2.2.3 相关性分析 本研究采用偏相关分析研究降水量、气温两个变量与 EEQ 的相关关系。偏相关分

析是指两个变量同时与第 3 个变量相关时,将第 3 个变量的影响剔除,而分析另两个变量之间相关程度的过程^[38]。其公式为:

$$r_{xy,z} = \frac{r_{xy} - r_{xz} - r_{yz}}{\sqrt{(1-r_{xz}^2)(1-r_{yz}^2)}} \quad (7)$$

式中: x_i 和 y_i 为第 i 年的值; r_{xy} 为变量 x 和变量 y 的相关关系。当 $r_{xy} > 0$ 时,代表两个变量间存在正相关关系,当 $r_{xy} < 0$ 时,代表量变量间存在负相关关系。

显著性检验采用 T 检验,其公式为:

$$t = \frac{r \cdot \sqrt{n-k-2}}{\sqrt{1-r^2}} \quad (8)$$

式中: r 为偏相关系数; n 为研究样本数; k 为可控变量个数; $n-k-2$ 为自由度。

2.2.4 多元回归分析及残差分析 本研究构建基于 EEQ、降水、气温的多元线性回归模型,并剔除模型中气候因素的影像,由此用残差^[32]来表征研究时段内气候变化以外的人类活动及土地利用的影响,其公式为:

$$EEQ_{ide} = aP + bT + c \quad (9)$$

$$EEQ_{cc} = EEQ_{rea} - EEQ_{ide}$$

式中: a, b, c 为模型参数; P, T 分别代表降水量及气温; EEQ_{ide} 为基于所建立的多元线性回归模型而得到的仅有气候因素作用的 EEQ 理想值; EEQ_{rea} 为数据的实际值; EEQ_{cc} 为代表剔除气候因素的其他因素的值,即土地利用等人类活动因素,最后基于公式(3)得到其变化趋势。

2.2.5 土地利用转移矩阵 本研究参照《土地利用现状分类标准》(GB/T21010-2017)将土地覆盖类型分为草地、林地、耕地、水体、建设用地和未利用地六大类。采用土地利用转移矩阵分析 2001—2019 年黄土高原土地利用类型的变化^[39]。其数学表达形式为:

$$U_{ij} = \begin{pmatrix} U_{11} & U_{12} & \cdots & U_{1(n-1)} & U_{1n} \\ U_{21} & U_{22} & \cdots & U_{2(n-1)} & U_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ U_{(n-1)n} & U_{(n-1)n} & \cdots & U_{(n-1)(n-1)} & U_{(n-1)n} \\ U_{n1} & U_{n2} & \cdots & U_{n(n-1)} & U_{nn} \end{pmatrix} \quad (10)$$

式中: U 为土地利用类型面积; U_{ij} 为研究时段初期 i 土地利用类型到研究时段末期转变成 j 土地利用类型的面积; n 为土地利用类型种类总数。为了直观表达研究时段内土地利用空间变化,采用 ArcGIS 对数据进行叠加处理得到各土地间相互转化的空间分布图。

3 结果与分析

3.1 生态环境质量时空变化特征

(1) 在本文时间变化特征分析研究时段内,黄土高原年均 EEQ 的变化如图 1 所示。2001—2010 年黄土高原年均 EEQ 呈现波动上升态势,其值变化介于 0.485 6~0.497 9 之间。2001,2005,2010 年为较低值,2003 年及 2008 年达到峰值;在 2003—2005 年及

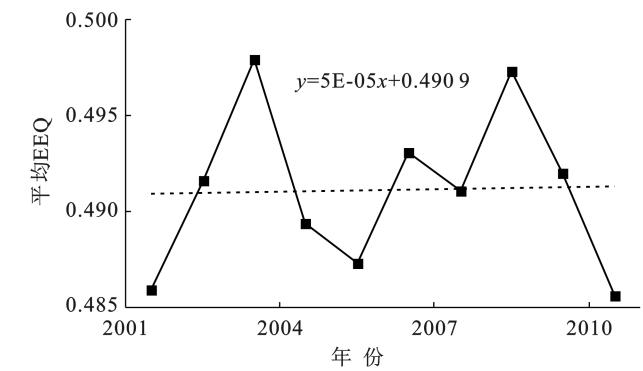


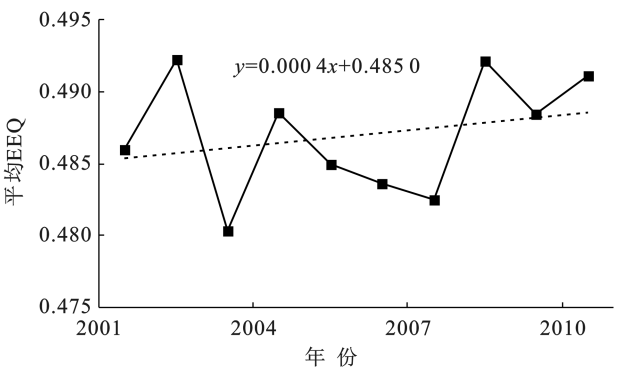
图 1 2001—2020 黄土高原生态环境质量 (EEQ) 变化趋势
Fig.1 Variation trend of ecological environment quality (EEQ) on Loess Plateau from 2001 to 2020

(2) 空间分布及变化分析根据 2000—2020 年黄土高原 EEQ 时空变化(图 2),对 2001,2010 及 2020 年 EEQ 按照生态系统质量分级。总体而言,黄土高原生态环境质量大部分区域为“一般”且较为稳定。

由图 2 可知,EEQ 为“差”的区域主要集中在库布齐沙漠及其西北部的荒漠地区;EEQ 评价为“良”及以上的主要分布在黄河流域中下游、黄土高原东南区域;评价为“较差”的区域主要分布在山西太原和临汾、陕西西安、甘肃兰州、青海西宁及宁夏银川和固原等城市一带,与李冠稳等^[5]研究一致。针对不同年份

2008—2010 年的变化幅度较大,出现了骤然降低的情况。

2010—2020 年黄土高原平均 EEQ 波动相较于 2001—2010 年而言较小,其值变化介于 0.480 3~0.492 2 之间。在 2012 年达到了峰值而 2013 年回落到低谷;其中 2014—2017 年持续走低而后呈现上升态势。总体而言 2001—2020 年黄土高原平均生态环境质量呈上升、下降、再上升的趋势。



进行面积统计(表 4)可知:在 2001—2020 年,EEQ 评价为“差”的区域逐年降低,由 2001 年的 2.03%降至 2020 年的 1.41%;评价为“良”及以上的区域由 2001 年的 13.84%升至 2020 年的 16.55%;而评价为一般的区域占比最多且总体稳定,在 78.15%~81.25%范围内波动变化。

(3) 趋势分析为了进一步研究黄土高原 EEQ 具体变化趋势,结合 MK 检验法针对 2001—2010 年及 2010—2020 年两个时间段内 EEQ 变化进行叠加分析,并将趋势分为 5 类。

表 4 2001—2020 年黄土高原生态环境质量分类面积统计
Table 4 Pixel statistics of ecological environment quality classification on Loess Plateau from 2001 to 2020

分类标准	2001 年		2010 年		2020 年	
	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%
差	13 160	2.03	11 227	1.73	9 082	1.41
较差	18 752	2.89	21 311	3.28	25 319	3.90
一般	527 582	81.25	517 358	79.67	507 479	78.15
良	64 256	9.90	67 919	10.46	73 494	11.32
优	25 590	3.94	31 525	4.85	33 966	5.23

在 2001—2010 年,变化较为显著的区域主要分布在黄土高原的中部及东南部区域(图 3)。其中太行山脉与吕梁山脉中间一带,即山西高原中南部(太原—临汾—运城)沿线一带城市地区整体呈下降趋势,而城区周围生态环境质量显著改善;同时,陕西延

安北部、西安西北部地区生态环境质量也呈明显改善状态,说明延安“退耕还草”“退耕还林”等生态修复工程措施卓有成效^[9];黄土高原西北部内蒙古自治区呼和浩特南部一带、陕北高原西北部及六盘山一带 EEQ 则呈下降趋势。

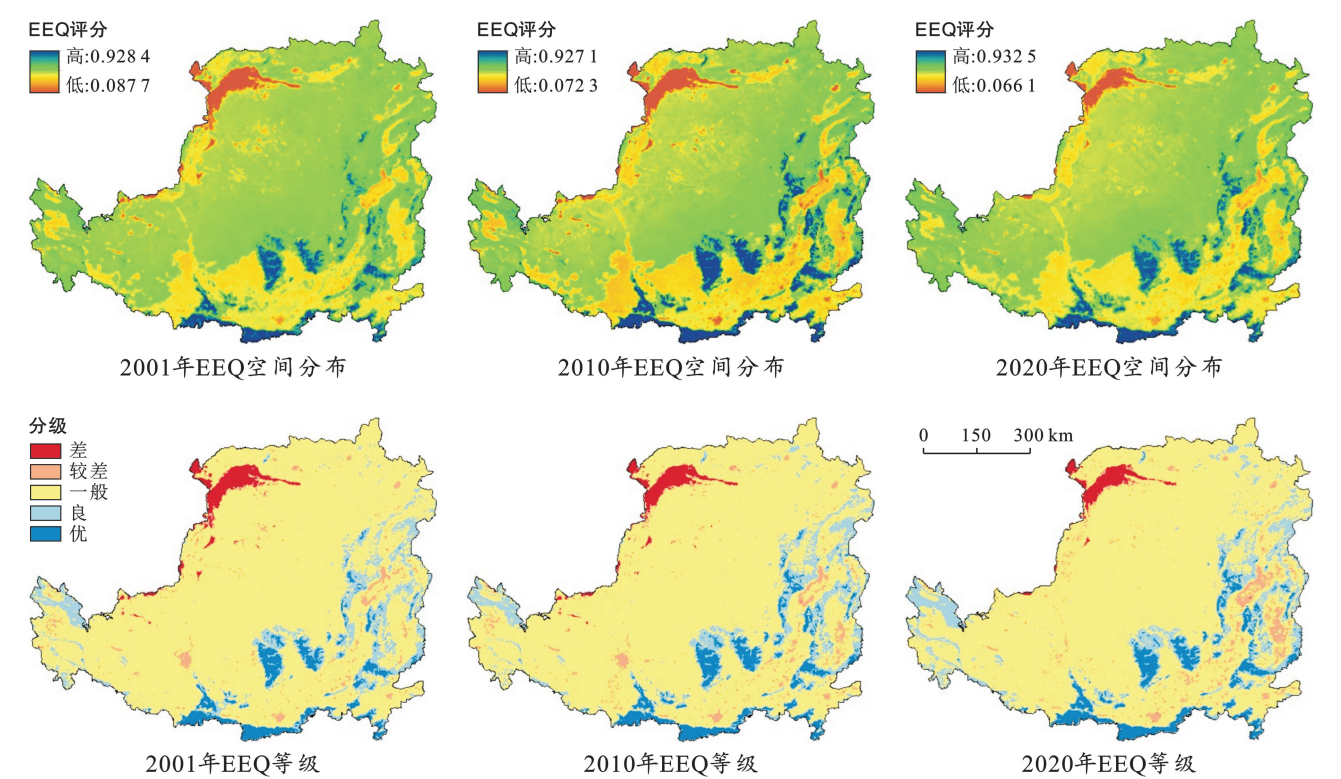


图 2 2001—2020 年黄土高原生态环境质量(EEQ)时空变化

Fig.2 Temporal and spatial changes of ecological environment quality (EEQ) on Loess Plateau from 2001 to 2020

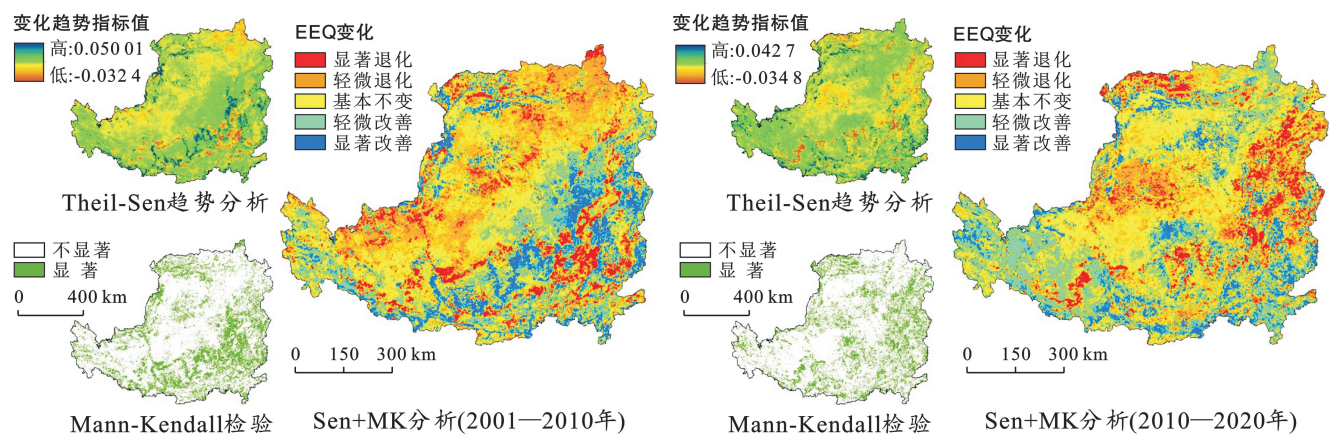


图 3 2001—2020 年黄土高原生态环境质量(EEQ)趋势分析

Fig.3 Analysis on trend of ecological environment quality (EEQ) on Loess Plateau from 2001 to 2020

通过对该时间段内的变化趋势进行像元统计(表 5)得知显著退化与轻微退化共占总面积的 33.37%,基本不变及以上的区域占比达66.63%,其中显著改善的区域为 12.21%,结果表明在此时间段内黄土高原大部分区域 EEQ 处于较为稳定的状态,但部分区域有恶化趋势。在 2010—2020 年,变化较为显著的区域从上个时间段的东南部向中东部地区偏移。其中山西东北部(太原—原平—五台山)地区整体呈显著下降趋势,由于山西大部分区域大气结构性污染问题突出、矿山开发破坏生态问题依旧存在,推

进水生态保护和修复治理的力度还不够,致使生态环境保护形式严峻;河套平原后套、鄂尔多斯高原南部毛乌素沙地及陕西延安城区一带也呈下降趋势;甘肃陇中高原、鄂尔多斯高原中东部地区相较以往有显著改善,与现有研究结果吻合^[34]。通过对该时段内的变化趋势进行像元统计(表 5)可以得出,有 26.11%的区域呈退化状态,相较于上个时间段减少了 7.26%;基本不变及以上的区域占总面积的 73.89%,其中基本不变的区域占比 45.24%,相较以往增加了 5.65%。结果表明该时间段内的 EEQ 相较以往得到

了改善并趋于稳定,这与李冠稳等人研究结果一致^[5],北部部分区域下降的原因可能是由于生态恢复工程落实以来,大规模的人工造林增加了土壤水分的消耗^[30],从而引起了一系列生态问题^[8]。

表 5 2001—2020 年黄土高原生态环境质量变化趋势面积统计
Table 5 Pixel statistics of ecological environment quality change trend on Loess Plateau from 2001 to 2020

Theil-Sen 斜率	Z 值	变化类型	2001—2010 年		2010—2020 年	
			面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%
<−0.001	<−1.96	显著退化	68 279	10.52	61 884	9.53
<−0.001	−1.96~1.96	轻微退化	148 307	22.85	107 640	16.58
−0.001~0.001	−1.96~1.96	基本不变	256 921	39.59	293 704	45.24
>0.001	−1.96~1.96	轻微改善	96 265	14.83	120 237	18.52
>0.001	>0.1.96	显著改善	79 242	12.21	65 761	10.13

3.2 气候变化影响分析

黄土高原地处干旱半干旱地区,降水量及气温的变化会直接影响地区蒸散量从而对 EEQ 产生间接影响,其中水分是限制区域生态系统发展的关键因素^[8]。由图 4 可知,2000—2020 年黄土高原年平均降水量为“先波动,后平稳”的状态,与 3.1 中 EEQ 的趋势类似,为了探两个气候因子的变化与 EEQ 之间的关系,分别对 EEQ 与降水量及气温的平均值进行相关分析(图 4)。时间上,黄土高原地区的降水量与 EEQ 存在一定的正相关关系($r\leq 0.4, p<0.1$)。其中 2001—2007 年的 EEQ 与降水量存在显著的正相关关

系($r=0.87, p<0.05$),在此之后降水量与 EEQ 整体相关性下降,说明这一因子之外的扰动进一步加剧。在 2010—2020 年 EEQ 与气温呈一定的负相关关系($r=-0.57, p<0.1$),相较过去 2001—2010 年($r=-0.17, p<0.1$)相关性有所提高,说明气温这一因子的负驱动力相较过去的时间段有所提升。黄土高原地区地处干旱和半干旱区,常年受风蚀、水蚀显著影响,而气温会导致干旱进一步加剧,也会使土壤沙化严重,土壤水分和植被冠层水分的蒸散发增加,不利于生态环境质量的改善。总体而言,降水量对 EEQ 的影响要大于气温,这一结果与陈万旭等研究结果一致^[6]。

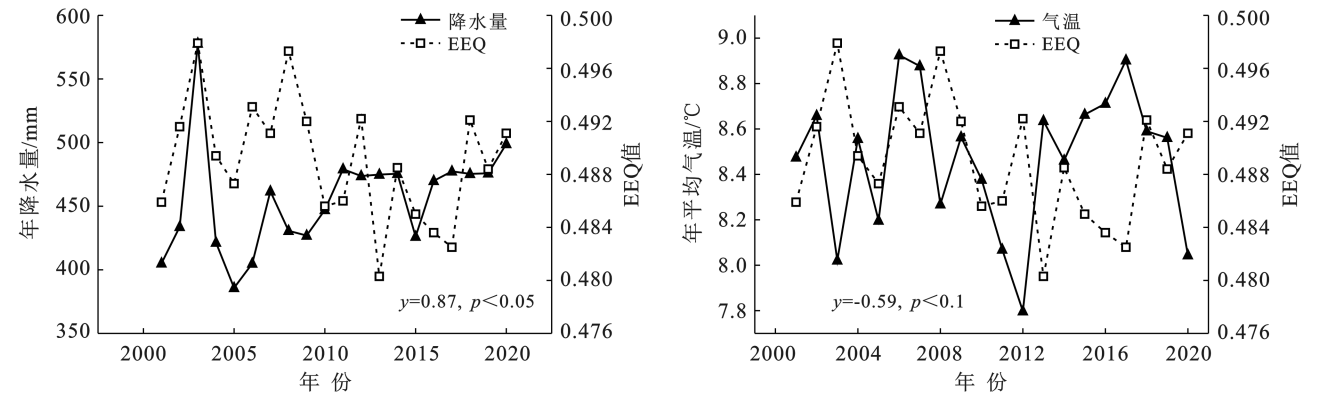


图 4 2001—2020 年黄土高原生态环境与气候变化相关分析
Fig.4 Correlation analysis between ecological environment and climate change on Loess Plateau from 2001 to 2020

对研究区内 EEQ 与降水及气温进行多元回归分析,并进行 $p<0.05$ 的显著性检验(图 5)。在 2001—2020 年,降水量回归系数大部分区域为正值,对 EEQ 主要为正面影响,其主要在内蒙古呼和浩特一带、山西大同—太原—运城城市带周边、陕西铜川以北、甘肃兰州分布,这些地区大多处于以草地为主的半干旱地带,当地植被及河网等生态系统受到降水量的制约,因此降水量对此地区的 EEQ 具有积极影响;同时,在黄土高原东南区域尤其是关中城市群一带人类活动密集区域降水量回归系数较小,这类地区建设用

地覆盖多而植被覆盖较少,因此降水量 EEQ 的影响较少。巴彦淖尔市南部荒漠地区大部分为未利用地,植被覆盖极少,因此降雨量影响微弱,值得注意的是在青海一带的高海拔地区降水量有负面作用,其原因是降雨量增加对植植被的正面作用不及其对温度降低的影响^[19]。气温回归系数于降水量而言总体较小,与降水量相反,该回归系数在大部分区域为负值,这是由于黄土高原大部分区域、蒸散发强^[30],气温的升高会导致蒸发量的增加,引起地面干化抑制植被的生长^[32],从而间接引起的 EEQ 的下降。而在内蒙古

呼和浩特市一带气温则有正面影响,这是由于该地区纬度及海拔较高,低气温会抑制植被的生长,导致生态环境质量下降,与上述降水量影响温度的原理类似。

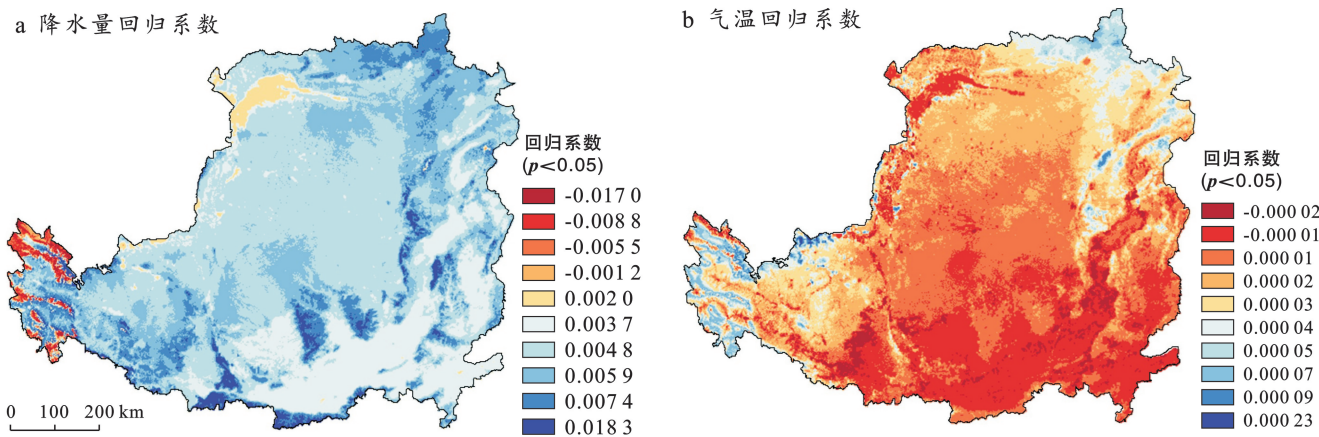


图 5 黄土高原生态环境与气候回归分析

Fig.5 Multi-regression analysis on partial correlation between ecological environment and climate on Loess Plateau

3.3 土地利用对生态环境质量(EEQ)的影响分析

(1) 基于 2001,2010 及 2019 年的 3 期土地利用空间分布数据,处理分析得到 2001—2010 年及 2010—2019 两个时间段内黄土高原土地利用转移矩阵,结果具体见表 6。由表 6 可知,2001—2010 年黄土高原土地首要转化方向是草地,其主要来源是耕地与未利用地,分别为 33 679,9 760 km²,占草地总面积的 36.36%和 10.60%;其次为林地,主要来源是草地,面积为 7 891 km²,占林地总面积的10.05%。该时段内还存在大量草地向耕地、耕地向建设用地的土

地开发,分别为 26 427 km² 与 9 760 km²。2010—2019 年土地转化方向主要为草地及林地,其主要来源是耕地及草地,面积分别为 24 893,7 106 km²,各自总面积的 7.80%和 7.56%;同时,未利用地向草地的转化仍在持续,其面积达到了5 574 km²。所有土地转化过程中耕地与草地相互转化的面积占比较大,这与已有的研究结果相符^[9],其中建设用地主要由耕地及少量的草地转化而来,这些地区集中在黄土高原东南部;另一方面来说大量耕地而非林地或草地的转化对黄土高原植被的影响较少。

表 6 2001—2020 年黄土高原土地利用类型转移矩阵
Table 6 Transfer matrix of land use types on Loess Plateau from 2001 to 2020

		2010 年面积						总计
土地利用类型		建设用地	草地	耕地	林地	水域	未利用地	
2001 年面积	建设用地	8 227	48	486	4	155	3	8 923
	草地	1 086	283 965	26 427	7 891	328	3 990	323 688
	耕地	5 328	33 679	162 808	2 606	657	36	205 115
	林地	22	3 739	1 275	78 497	6	0	83 538
	水域	91	98	328	15	1 689	28	2 250
	未利用地	143	9 760	198	0	63	17 081	27 246
	总计	14 897	331 289	191 523	89 014	2 898	21 138	650 759
		2019 年面积						总计
土地利用类型		建设用地	草地	耕地	林地	水域	未利用地	
2010 年面积	建设用地	14 741	0	13	0	146	0	14 900
	草地	901	295 506	23 560	7 106	198	3 961	331 232
	耕地	3 017	24 893	161 846	1 423	422	34	191 635
	林地	25	781	1 264	86 845	5	0	88 920
	水域	141	111	313	0	2 306	28	2 899
	未利用地	107	5 547	234	0	43	15 242	21 173
	总计	18 932	326 838	187 230	95 374	3 120	19 265	650 759

(2) 经过空间分析得出研究区域内土地利用转移空间分布特征(图 6),结果如下:在 2001—2010 年,耕地向草地的转化分布在除了内蒙古自治区鄂尔多斯高原、宁夏北部及关中平原一带的大部分地区,未利用地向草地转化大部分主要呈块状分布在黄土高原西北地区鄂尔多斯高原,大量的草地恢复是维持当地生态环境稳定的重要驱动因素^[9];草地向林地的转化主要分布在陕西延安及山西吕梁山一带,说明在该时间段初期延安退耕还林、还草项目有显著的效果;

内蒙古作为中国荒漠化最严重的区域之一,草地存在部分向未利用地的退化现象。2010—2019 年,黄土高原土地利用转化分布情况总体与 2001—2010 年相似,但转化面积有所减少。其中,山西大部分区域草地向林地的转化幅度减少,内蒙古自治区鄂尔多斯高原部分区域未利用地向草地转化覆盖范围有所缩小;关中平原等地区建设用地的转化相较于上个时间段而言大幅度减少,说明该地区建设用地的开发速度有所放缓。

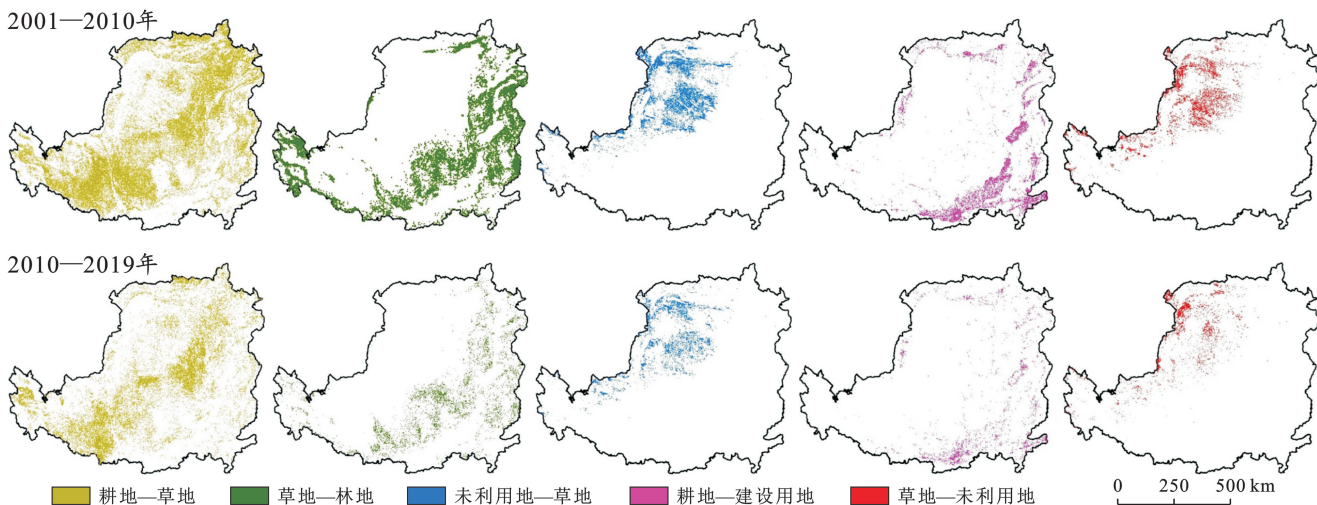


图 6 2001—2010 年,2010—2019 年黄土高原土地利用转移空间分布

Fig.6 Spatial distribution of land use transfer on Loess Plateau from 2001 to 2010, and 2010 to 2019

(3) 为了进一步探究 2001—2010 年及 2010—2019 年两个时间段内黄土高原的土地转移对于生态环境质量的影响,针对不同土地转移变化于 EEQ 改善的程度进行像元统计,结果如下:2001—2010 年,草地向林地转移的像元中,有 60.81% 呈改善趋势,85.80% 保持稳定并增长;未利用地向草地转移的像元中,有 31.72% 呈改善趋势,74.32% 保持稳定并增长;耕地向草地转移的像元中,有 22.17% 呈改善趋势,65.67% 保持稳定并增长;而在耕地向建设用地及草地向未利用地转移的两类变化中,两者 EEQ 均主要呈现退化趋势,分别占据了像元总数的 51.63%,41.57%。2010—2019 年,草地向林地转移的像元中,有 53.67% 呈改善趋势,82.58% 保持稳定并增长;未利用地向草地转移的像元中,有 31.89% 呈改善趋势,66.56% 保持稳定并增长;耕地向草地转移的像元中,有 23.62% 呈改善趋势,70.74% 保持稳定并增长;与 2001—2010 年不同的是,在耕地向建设用地及草地向未利用地转移的两类变化中,二者 EEQ 的退化趋势得到了缓减,分别为 44.08%,34.44%。综上所述,草地—林地的转化是当地 EEQ 改善的最主要的因

素,其次分别为:未利用地—草地、耕地—草地。耕地—建设用地转移区域的 EEQ 在两个研究均呈明显的下降趋势,但有所缓解,与上个时间段相比减小幅度达到了 14.62%,说明在 2010—2019 年的开发建设所造成的影响减弱,与前文的结果相符。

(4) 为了更好地评价气候变化外的土地利用等人类活动对 EEQ 的影响,针对 EEQ 及气候数据进行残差分析(图 7)并针对残差趋势按照 3.1 中的结果进行分类。结果表明黄土高原在 2001—2020 年,山西临汾—运城城区一带、甘肃定西北部、延安市部分地区,残差呈现较为明显的抑制作用,这些地区城市群较为集中,尤其是山西一带耕地向建设用地的土地利用转变较大,工程建设等对当地生态环境产生了负面作用;而内蒙古鄂尔多斯西北部地区、内蒙古乌海市及陕西宝鸡一带则有明显的促进作用,一方面是当地生态修复类项目建设落实完善,另一方面是人类活动所造成的影响变小,如 2010—2020 年关中平原一带城建转化的放缓。针对残差趋势进行像元统计,有 32% 的地区残差呈现下降趋势、68% 的地区呈现稳定或上升的趋势,由此说明目前土地利用等人类活动对于 EEQ

的影响总体是正面的,具有明显的空间异质性,并且这个趋势在未来仍会持续一段时间。研究表明,黄土高原地区人类对当地土地变化尤其是植被覆盖的贡献率超过了80%^[40],生态保护工程的实施^[7]促进了西北地区土地利用类型由低生态环境质量背景类型向高生态

环境质量背景转型。另一方面而言,虽然黄土高原生态的恢复已取得一定成效^[9, 32],但由于生态环境本底脆弱、受到人类干扰及人工植被衰败的影响,在恢复与治理过程中就会产生诸如土壤干化、植被衰败或淤地坝拦沙效益下降等问题^[41],因此应予以重视。

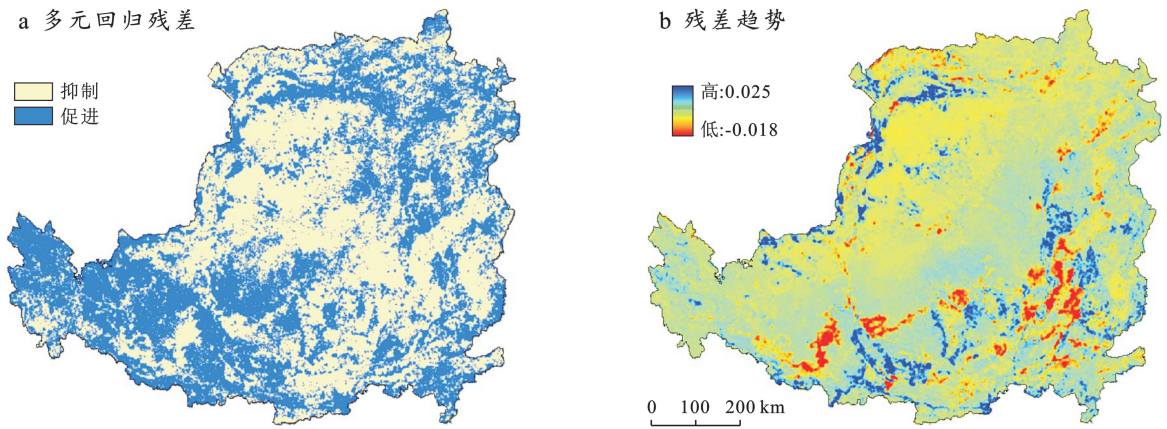


图7 2001—2020年黄土高原生态环境质量残差变化及趋势分布

Fig.7 Residual variation and trend distribution of eco-environmental quality on Loess Plateau from 2001 to 2020

4 结论

(1) 时间上,2001—2020年黄土高原EEQ总体一般,呈现上升、下降、再上升的趋势,其中2010—2020年相较于2001—2010年时间段而言变化波动较小;空间上,呈现“东南高,西北低”的格局,较高的区域主要分布于黄河流域中下游、东南部的林地区域,较低的区域主要分布在西北部的荒漠及人口密度较大的城市群地区。2010—2020年相较于2001—2010年而言,显著增加的区域由东南部向中北部区域转移,显著下降的区域由西北部向东部转移。

(2) 黄土高原降水对植被覆盖地区的EEQ有积极影响,而对建设用地为主的城区或是荒漠地区影响较小。气温对EEQ而言大部分区域呈负面作用,并且影响明显小于降水,在植被覆盖较多的高纬度区域则呈现一定的积极作用。

(3) 研究时段内,土地转耕地向草地、草地向林地及未利用地向草地的转移是研究区内EEQ稳中向好现象的主要驱动力,耕地向建设用地、草地向未利用地的转移是引起EEQ下降的重要因素;黄土高原退耕还林、还草工程取得了一定的修复成效,研究时段后期建设用地的开发对EEQ造成的影响变小,主要集中在关中及晋中城市群一带;以土地利用为主的人类活动对EEQ总体呈正面影响,具有明显的空间异质性。

【参考文献】

- [1] 刘小燕,崔耀平,董金玮,等.黄河中下游影响区生态空间和生态指数变化评估[J].生态学报,2021,41(20):8030-8039.
- [2] 宋美杰,罗艳云,段利民.基于改进遥感生态指数模型的锡林郭勒草原生态环境评价[J].干旱区研究,2019,36(6):1521-1527.
- [3] Vitousek P M. Beyond global warming: Ecology and global change [J]. Ecology, 1994,75(7):1861-1876.
- [4] Liu Yan, Huang Xianjin, Yang Hong, et al. Environmental effects of land-use/cover change caused by urbanization and policies in Southwest China karst area: A case study of Guiyang [J]. Habitat International, 2014,44:339-348.
- [5] 李冠稳,高晓奇,肖能文.基于关键指标的黄河流域近20年生态系统质量的时空变化[J].环境科学研究,2021,34(12):2945-2953.
- [6] 陈万旭,李江凤,曾杰,等.中国土地利用变化生态环境效应的空间分异性与形成机理[J].地理研究,2019,38(9):2173-2187.
- [7] 金钊.黄土高原沟道治理:几百年来与洪水和泥沙的斗争[J].地球环境学报,2020,11(5):574-582.
- [8] 王凯利,王志慧,肖培青,等.气候与下垫面变化对黄土高原蒸散发变化的影响评估[J].水土保持学报,2022,36(3):166-172.
- [9] 毛盛林,上官周平.近20年黄土高原土地利用/植被覆盖变化特征及其成因[J].水土保持研究,2022,29(5):213-219.
- [10] 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.
- [11] 杭鑫, 罗晓春, 曹云, 等. 基于 RSEI 模型的生态质量评估及城镇化影响: 以南京市为例[J]. 应用生态学报, 2020, 31(1): 219-229.
- [12] 李红星, 黄解军, 梁友嘉, 等. 基于遥感生态指数的武汉市生态环境质量评估[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2020, 42(1): 81-90.
- [13] 程志峰, 何祺胜. 基于 RSEI 的苏锡常城市群生态环境遥感评价[J]. 遥感技术与应用, 2019, 34(3): 531-539.
- [14] 文超, 詹庆明, 樊智宇, 等. 1979—2019 年武汉市重点水体多要素协同的时空演变特征[J]. 地球信息科学学报, 2021, 23(11): 2055-2072.
- [15] 胡思汉, 姚玉增, 付建飞, 等. 基于 RSEI 指数的东北矿区生态质量变化评价: 以辽宁弓长岭区为例[J]. 生态学杂志, 2021, 40(12): 4053-4060.
- [16] 杨凤海, 宋佳佳, 赵烨荣, 等. 东北黑土水土流失区生态环境遥感动态监测[J]. 环境科学研究, 2018, 31(9): 1580-1587.
- [17] 李婷婷, 马超, 郭增长. 基于 RSEI 模型的贺兰山长时序生态质量评价及影响因素分析[J]. 生态学杂志, 2021, 40(4): 1154-1165.
- [18] 排日海·合力力, 咎梅, 阿里木江·卡斯木. 乌鲁木齐市生态环境遥感评价及驱动因子分析[J]. 干旱区研究, 2021, 38(5): 1484-1496.
- [19] 杜高奇, 李自强, 赵勇, 等. 基于 RSEI 的黄河流域生态环境质量监测与驱动因素分析[J]. 水利水电技术(中英文), 2022, 53(12): 81-93.
- [20] 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.
- [21] 宋珂, 王玉军, 李胤. 1999—2020 年长江经济带(江苏段)生态环境变化监测及人类活动驱动分析[J]. 测绘通报, 2021(2): 7-12.
- [22] 何盈利, 尤南山, 崔耀平, 等. 2000 年来中国生态状况时空变化格局[J]. 自然资源学报, 2021, 36(5): 1176-1185.
- [23] Liao Weihua, Jiang Weiguo. Evaluation of the spatio-temporal variations in the eco-environmental quality in China based on the remote sensing ecological index [J]. Remote Sensing, 2020, 12(15): 2462.
- [24] 王杰, 马佳丽, 解斐斐, 等. 干旱地区遥感生态指数的改进: 以乌兰布和沙漠为例[J]. 应用生态学报, 2020, 31(11): 3795-3804.
- [25] 朱冬雨, 陈涛, 牛瑞卿, 等. 利用移动窗口遥感生态指数分析矿区生态环境[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(3): 341-347.
- [26] 付杰, 王萍, 张清, 等. 基于改进遥感生态指数的海南岛生态环境质量动态变化[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(6): 1102-1111.
- [27] 张睿, 刘修国, 徐栋等. 2001—2019 年洞庭湖流域生态环境质量时空变化及其影响因素[J]. 测绘通报, 2023, 551(02): 1-8.
- [28] Xu Dong, Yang Feng, Yu Le, et al. Quantization of the coupling mechanism between eco-environmental quality and urbanization from multisource remote sensing data [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 321: 128948.
- [29] 耿静, 徐栋, 吴御豪, 等. 海南岛生态环境质量时空变化及其对气候变化与人类活动的响应[J]. 生态学报, 2022, 42(12): 4795-4806.
- [30] Liu Yu, Miao Haitao, Huang Ze, et al. Soil water depletion patterns of artificial forest species and ages on the Loess Plateau (China) [J]. Forest Ecology and Management, 2018, 417: 137-143.
- [31] 张家政, 李崇贵, 王涛. 黄土高原植被覆盖时空变化及原因[J]. 水土保持研究, 2022, 29(1): 224-230.
- [32] 张乐艺, 李霞, 冯京辉, 等. 2000—2018 年黄河流域 NDVI 时空变化及其对气候和人类活动的双重响应[J]. 水土保持通报, 2021, 41(5): 276-286.
- [33] 李晓明, 孙从建, 孙九林, 等. 基于遥感信息的黄土高原主要灌溉农业分布区生态安全特征[J]. 应用生态学报, 2021, 32(9): 3177-3184.
- [34] 刘荔昀, 鲁瑞洁, 丁之勇, 等. 黄土高原气候变化特征及原因分析[J]. 地球环境学报, 2021, 12(6): 615-631.
- [35] Yang Jie, Huang Xin. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019 [J]. Earth System Science Data, 2021, 13(8): 3907-3925.
- [36] Gao Xiang, Huang Xingxing, Lo K, et al. Vegetation responses to climate change in the Qilian Mountain Nature Reserve, Northwest China [J]. Global Ecology and Conservation, 2021, 28: e01698.
- [37] Li Yi, Yao Ning, Chau H W. Influences of removing linear and nonlinear trends from climatic variables on temporal variations of annual reference crop evapotranspiration in Xinjiang, China [J]. Science of the Total Environment, 2017, 592: 680-692.
- [38] Yin Lichang, Wang Xiaofeng, Feng Xiaoming, et al. A comparison of SSEBop-model-based evapotranspiration with eight evapotranspiration products in the Yellow River Basin, China [J]. Remote Sensing, 2020, 12: 2528.
- [39] 徐国印, 王忠静, 胡智丹, 等. 柴达木盆地土地利用/覆被综合指数评价[J]. 水力发电学报, 2019, 38(9): 44-55.
- [40] 金凯, 王飞, 韩剑桥, 等. 1982—2015 年中国气候变化和人类活动对植被 NDVI 变化的影响[J]. 地理学报, 2020, 75(5): 961-974.
- [41] 吕一河, 高光耀, 罗毅, 等. 黄土高原区域生态综合研究: 机理深化与方法拓展[J]. 生态学报, 2016, 36(22): 7069-7073.