



· 人地系统耦合与演化机制 ·

秦巴山区人地关系演化特征及交互机理： 以陕南三市为例

张欣蓉¹, 董玉玉², 刘彦随³, 员学锋⁴

1. 西安建筑科技大学 陕西省新型城镇化与人居环境研究院, 陕西 西安 710055;

2. 西安建筑科技大学 建筑学院, 陕西 西安 710055;

3. 河南大学 地理科学与工程学部, 河南 郑州 450046;

4. 长安大学 陕西省土地整治重点实验室, 陕西 西安 710075

摘要: 秦巴山区作为中国的战略要地、生态高地和经济洼地,其水土流失严重、地质灾害频发、土地过度开发等问题严重,人地关系矛盾突出。本研究借助遥感和地理空间等数据,利用耦合协调度和地理加权回归模型(GWR)等方法,探究陕南秦巴山区人地关系的时空演变规律,揭示其交互作用机理。结果表明:2000-2020年陕南秦巴山区人口呈现往中心城区集聚的特征,98%区域植被覆盖呈增加趋势,耕地面积缩减了4103.06 km²,主要转移为林地、建设用地和草地。60%以上区域人类活动为低强度等级,而70%以上区域自然环境为好和极好等级。人地系统耦合度和协调度均呈现河谷盆地及中心城区高,南北起伏山区低的分布格局,低度耦合和严重失调面积呈扩张趋势,而较高耦合和濒临失调面积呈缩减趋势。人地关系交互作用存在明显的时间动态性和空间异质性,自然指标与耕地面积占比的相关程度逐年减轻,而与建设用地面积占比的相关程度逐年增强。仅产水量和气温在70%以上区域对人类活动强度影响为正向,其余人地系统交互作用均在50%以上区域为负向效应。研究结果可为陕南地区生态保护与经济高质量发展提供决策支持。

关键词: 人地关系;人类活动强度;自然环境指数;秦巴山区

中图分类号:K901

Evolution characteristics and interaction mechanism of human-earth relationships in the Qinling-Daba Mountain Areas: A case study of three cities in Southern Shaanxi

ZHANG Xinrong¹, DONG Yuyu², LIU Yansui³, YUAN Xuefeng⁴

1. The Research Institute of New Urbanization and Human Settlement in Shaanxi Province, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

2. College of Architecture, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

3. Faculty of Geographical Science and Engineering, Henan University, Zhengzhou 450046, China;

收稿日期:2025-09-15

基金项目:国家自然科学基金项目(42501245);陕西省科协青年人才托举计划项目(20260709);长安大学中央高校基金项目(300102355504)。

4. Shaanxi Key Laboratory of Land Consolidation, Xi'an 710054, China

Abstract: As a strategically significant location, ecological highland, and economically underdeveloped area in China, the Qinling-Daba Mountain is characterized by pronounced contradictions in human - earth relationships, manifested in severe soil erosion, frequent geological disasters, excessive land exploitation. Based on remote sensing and geospatial data, this study employed the coupling coordination degree and the geographically weighted regression (GWR) model to explore the spatio-temporal evolution and interaction mechanism of human - earth relationships in the Qinling-Daba Mountain areas of southern Shaanxi. Results indicated that the population tended to concentrate in central urban areas, and vegetation cover increased in 98% of the region. During this period, cropland decreased by 4103.06 km², primarily converted into forest land, construction land, and grassland. Over 60% of the study area presented low human activity intensity, while region with higher and high natural environment index accounted for more than 75%. The coupling degree and coordination degree of the human - earth relationships exhibited a spatial distribution characterized by higher values in river valley basins and central urban areas, and lower values in the undulating mountainous regions to the north and south. There was an observable expansion in areas with low coupling and severe incoordination, while areas with higher coupling and mild incoordination showed a shrinking trend. The human-earth interaction exhibited significant temporal dynamics and spatial heterogeneity. The correlation between natural indicators and the proportion of cropland gradually declined over time, while the correlation with the proportion of construction land steadily strengthened. Only water yield and temperature were positively influenced by human activity intensity in regions exceeding 70%, whereas the remaining interaction relationships within the human - earth system were negatively impacted in areas above 50%. The findings of this study could offer valuable decision-making support for ecological conservation and high-quality economic development in southern Shaanxi.

Key words: human-earth relationships; human activity intensity; natural environment index; Qinling-Daba Mountain Areas

人地关系是人类活动与自然环境之间的作用与联系,是地理学研究的核心命题^[1]。在“人类世”的时代背景下,生物多样性减少、臭氧层变薄、氮磷循环失衡、海洋酸化等方面超出行星边界,地球生态系统逼近九大极限^[2]。2015年,联合国提出17项可持续发展目标(SDGs),其中目标的6清洁饮水和卫生设施、7廉价和清洁能源、11可持续城市和社区、12负责任的消费和生产、13气候行动、14水下动物、15陆地生物,都旨在协调社会经济发展和生态环境^[3]。未来地球计划、生物多样性和生态系统服务政府间科学政策平台等一些国际研究机构,以及人与自然耦合系统项目、人与生物圈计划等一些国际项目均致力于探索人地系统演变规律及耦合机制^[4]。我国生态文明建设、美丽中国建设、“绿水青山就是金山银山”、“生态产业化、产业生态化”、人与自然生命共同体等重大战略和重要理念,均旨在促进人与自然和谐共生的中国式现代化建设^[5]。

目前学术界主要从人地关系的理论界定^[6]、

耦合评价^[7]、时空演变^[8,9]、驱动机理^[10]和优化路径等方面开展研究。刘彦随^[6]提出的“人地圈”模型(HESS)、方创琳^[11]构建的耦合调控器和“耦合魔方”等,均在理论层面指出人地系统是由水、土地、气候、生态等自然系统与人口、经济、社会、政策等人类系统相互联系、相互作用形成的复杂开放巨系统。定量研究主要围绕土地覆被变化^[12]、经济增长与污染排放^[13]、城乡人口与土地^[14,15]、水-能-粮多要素耦合^[16]、城镇化与生态环境^[17]、生态系统服务与人类福祉^[18]等开展。可见,人地关系的综合评价逐渐从单要素表征向多要素耦合、系统化评价方向发展。已有研究多聚焦城市^[18]、流域^[14]、沿海地区^[17]、农牧交错带^[19]等重点地区,对欠发达山区人地关系综合评价较少。且多利用统计数据在行政尺度上分析,缺乏格网尺度上的精细研究,难以支撑当前国土空间规划精细化评估以及生态环境格网化监测。

人类活动与自然环境之间存在复杂的双向互馈关系,既表现为正向促进作用也表现为负向的

抑制作用。从正向互馈来看,健康的生态系统可为人类提供各种产品和服务,是人类生存和可持续发展的基础保障。同时,人类可通过植树造林、土地整治、土壤改良等生态工程^[20, 21],以及资金技术的投入改善区域生态环境。从负向反馈来看,生态系统可通过自然灾害、土地退化、资源短缺等反噬制约社会经济发展。人类活动也可通过土地开发、污染排放、资源消耗等破坏生态环境。然而,现有研究多聚焦于人类活动对植被覆盖^[22]、地表径流^[23]和生态系统质量^[24]的影响机制,较少的关注自然环境对人类活动的反馈路径和强度。部分研究采用地理探测器、固定效应模型等分析人地系统耦合协调度的影响因素^[25, 26],但所选影响因素与人地系统耦合指标体系间存在重复性和共线性的风险,难以深入揭示人地关系交互作用的内在机理。这些方法多从全局性角度出发,忽略了人地关系的区域差异性和空间异质性。地理加权回归模型(GWR)是一种局域空间统计方法,可充分考虑自变量与因变量之间的空间非平稳,有助于全面了解人地关系的交互作用机理。

秦巴山区是我国重要的生态屏障和生态功能区,在调节气候、涵养水源、维持生物多样性、固碳释氧等方面发挥着关键作用,对全国乃至全球生态安全具有深远影响^[27]。然而,该区域垂直梯度分异显著,土壤层浅薄,坡面物质稳定性差,地质构造复杂,生态系统对外界环境的干扰极为脆弱和敏感^[28]。1949-2020年陕南地区人口增长了1.04倍,公路里程增长约62倍。修建公路、铁路、水库,以及矿产开发、森林砍伐、城镇扩张等一系列高强度人类活动,对生态系统造成巨大压力^[29]。因此,如何协调人类活动与自然环境关系,促进区域生态保护与高质量发展成为陕南秦巴山区亟需

解决的现实问题。

鉴于此,本研究首先选择人口、土地、植被3个核心变量,解析陕南秦巴山区人地系统要素的时空演变特征,其次构建格网尺度的人类活动强度(HAI)和自然环境指数(NEI)2个系统变量,探究“人”、“地”子系统的时空演变特征及两者耦合协调水平,最后结合相关分析和GWR模型揭示人地关系交互作用的空间异质性,以期丰富山区人地关系理论内涵,促进陕南地区人地关系协调与可持续发展提供科学支撑。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

陕南秦巴山区地处秦岭中段核心位置,位于 $105^{\circ}30' \sim 111^{\circ}1' E$, $31^{\circ}42' \sim 34^{\circ}25' N$ 之间,总面积约为 $7.02 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。地形复杂多变,最低海拔为155.06 m,最高海拔为3033.17 m,平均海拔为1084.12 m(图1)。该区域北侧为秦岭山脉,南侧为巴山山脉,中间为汉江,形成“两山夹一川”的地貌骨架^[30]。该区涵盖了陕西省南部地域,包括安康、汉中、商洛3地市所辖的28区县。地处北方暖温带和亚热带气候的交界处,气候温和,降雨充沛,多年平均气温为 $12.56^{\circ}C$,多年平均降雨量为863.30 mm。根据2023年数据显示,该地区常住人口约为764万人,占陕西省总人口19.33%,GDP为3947.74亿元,贡献了陕西省11.73%生产总值。境内80%以上区域为林地,是我国重要的生态功能区,也是经济发展相对落后的集中区域,面临生态保护与经济发展双重压力,亟需探索一条在保护中发展、在发展中保护的绿色崛起之路。



图1 研究区概况

Fig. 1 General situation of the study area

1.2 数据来源

数据主要包括2000-2020年逐年降雨、气温、潜在蒸散发、土地利用、NDVI、NPP、人口密度、夜间灯光和 CO_2 排放量数据(表1),土壤数据来源于

第二次全国土地调查南京土壤所提供的1:100万土壤数据。对不同来源的数据,统一转换为投影坐标WGS_1984_Albers,并通过重采样将空间分辨率统一为500 m。

表1 数据来源
Tab. 1 Data description

数据类型	数据来源	空间分辨率
降雨和气温数据	国家地球系统科学数据中心 (http://www.geodata.cn/)	1000 m
潜在蒸散发数据	国家青藏高原科学数据中心 (https://data.tpdc.ac.cn/)	1000 m
土地利用数据	武汉大学 30m 长时间序列逐年土地覆被数据(https://essd.copernicus.org/)	30 m
NDVI数据	国家青藏高原科学数据中心 (https://data.tpdc.ac.cn/)	250 m
植被净初级生产力数据	美国国家航空航天局(http://modis.gsfc.nasa.gov/)	500 m
土壤数据	寒区旱区科学数据中心(http://westdc.westgis.ac.cn)	1000 m
人口密度数据	全球人口密度分布数据集(https://www.worldpop.org/)	100 m
夜间灯光数据	国家地球系统科学数据中心 (http://www.geodata.cn/)	500 m
CO ₂ 排放量数据	人类成因二氧化碳开放数据清单(ODIAC)(https://db.cger.nies.go.jp/dataset/ODIAC/)	1000 m

2 研究方法

2.1 人地系统指标体系构建与权重计算

人地系统是由人类活动与自然环境两个子系统相互联系、相互作用形成的复杂开放巨系统。其中人类活动强度(HAI)是度量人类改造、开发

和利用陆地表层环境的有效指标,是评价人类活动对自然环境影响的重要参数。本研究基于已有文献^[8, 31, 32]和研究区数据获取情况,从人口集聚、经济发展、土地利用、污染排放四个维度,选择人口密度、夜间灯光强度、耕地面积占比、建设用地面积占比和CO₂排放量5个指标来综合确定区域人类活动强度(图2)。

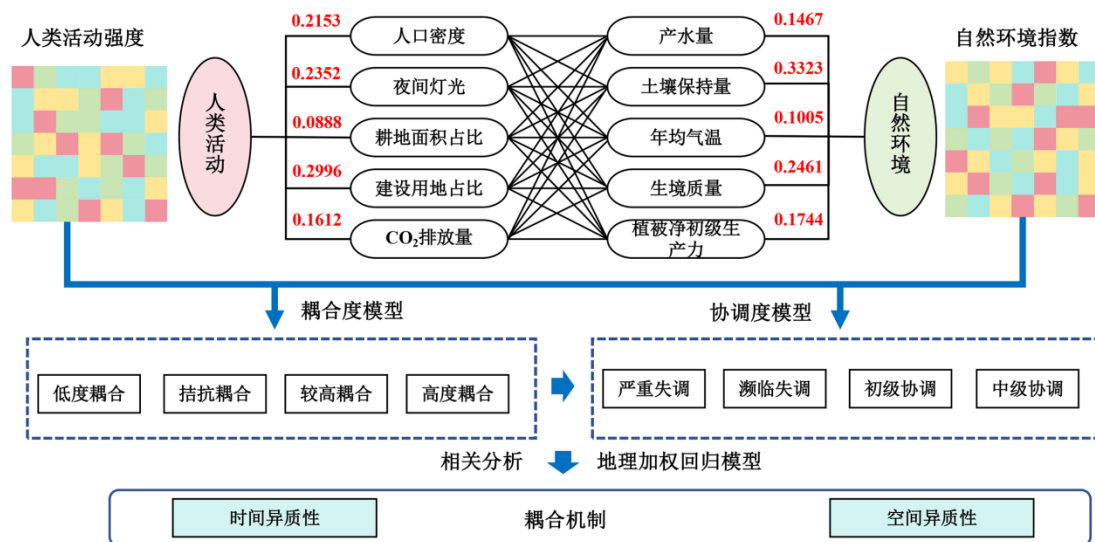


图2 研究框架

Fig. 2 Study framework

作为我国南北气候过渡区、水源涵养区、生物多样性富集区、固碳释氧区等^[27, 33], 陕南秦巴山区具有其独特的地理条件和生态特征, 受复杂地质地貌的影响, 极易引发强烈水土流失和土壤侵蚀, 故本研究从水、土、气、生、植五个维度, 选择产水

量、土壤保持量、年均气温、生境质量和植被净初级生产力5个指标来综合确定区域自然环境指数(NEI)。各自然指标的具体计算方法见表2。采用极差标准法对不同指标进行无量纲化处理, 同时运用主观层次分析法和客观熵权法相结合的方

法确定综合权重,具体权重数值见图2。

表2 自然指标的计算方法

Tab. 3 Method used to quantify natural indicators

指标	方法	公式	变量含义
产水量	InVEST模型产水量模块	$WY(x) = (1 - \frac{AET(x)}{P(x)}) \times P(x)$	$WY(x)$ 为栅格单元 x 的产水量(mm); $P(x)$ 为年降雨量(mm); $AET(x)$ 为年实际蒸散量(mm)
土壤保持	RUSLE模型	$SC = R \times K \times LS \times (1 - C \times P)$	SC 为土壤保持量(t/km^2); R 为降雨侵蚀力因子; K 为土壤可蚀性因子; L, S 为坡长、坡度因子; C 为植被覆盖因子; P 为水土保持措施因子
生境质量	InVEST模型生境质量模块	$Q_{sj} = H_j (1 - (\frac{D_{sj}^{2.5}}{D_{sj}^{2.5} + K^{2.5}}))$	Q_{sj} 为土地利用类型 j 中栅格单元 x 的栖息地质量; H_j 为土地类型 j 的生境适宜度; D_{sj} 为生境退化度,代表土地利用类型 j 中栅格单元 x 的威胁水平; K 为半饱和系数

2.2 耦合协调度模型

耦合程度反映两个及以上系统之间的相互作用、彼此影响的程度,协调程度衡量两个及以上系统之间的整体效应和协同/协调发展水平^[34]。本研究引入耦合协调度模型评估陕南秦巴山区人类活动和自然环境2个子系统之间的耦合程度和协调状况,具体计算公式如下:

$$C = \sqrt{\frac{HAI \times NEI}{[(HAI + NEI) / 2]^2}} \quad (1)$$

$$T = \alpha \times HAI + \beta \times NEI \quad (2)$$

$$D = \sqrt{C \times T} \quad (3)$$

式中, HAI 、 NEI 别为人类活动强度和自然环境指数, C 为耦合度, $C \in [0, 1]$,其值越大表明人地系统良性互动程度越高。 T 为综合评价指数,本文认为人类活动与自然环境同等重要,故两者待定参数 α 和 β 分别取0.5。 D 为耦合协调度, $D \in [0, 1]$,其值越大表明两者协调性越高,系统趋向于有序方向发展。结合前人研究^[35],将耦合度划分为 $[0, 0.3)$ 低度耦合、 $[0.3, 0.5)$ 拮抗耦合、 $[0.5, 0.8)$ 较高耦合、 $[0.8, 1]$ 高度耦合4个等级,将协调度划分为 $[0, 0.2)$ 严重失调、 $[0.2, 0.4)$ 濒临失调、 $[0.4, 0.6)$ 初级协调、 $[0.6, 0.8)$ 中级协调、 $[0.8, 1]$ 高级协调5个等级。

2.3 地理加权回归模型

Pearson相关分析可以度量两个连续变量之间的线性相关关系,已被广泛应用于系统间或功能间的相互作用关系^[36, 37],但无法揭示相互作用关系的空间异质性。这就需要引入地理加权回归模型(GWR),该模型将样点位置信息纳入回归方程,可以捕捉变量间关系随位置变化所产生的空

间非平稳性,反映传统线性回归模型所忽略的局部特性^[38, 39],使结果更加贴合实际。基于此,本文采用GWR模型探索人地系统交互作用的空间异质性。具体公式如下:

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_{n=1}^N x_{in} \beta_n(u_i, v_i) + \varepsilon_i \quad (4)$$

式中, y_i 为因变量; x_{in} 为自变量; (u_i, v_i) 为第 i 个样本的空间坐标; $\beta_0(u_i, v_i)$ 为第 i 个样本的常数项,为回归方程截距; N 为自变量个数; $\beta_n(u_i, v_i)$ 为第 i 个样本第 n 个参数的回归系数,其大小表示相关程度的强弱; ε_i 为随机误差项。本研究基于R. 4. 3. 2平台的“GWmodel”包,实现格网尺度上GWR模型计算。

3 人地关系的时空演变特征

3.1 人地系统关键要素的时空演变

2000-2020年陕南秦巴山区人口密度呈显著增长趋势(图3),年均增长速率为0.029人/($km^2 \cdot a$) ($R^2=0.87$)。2003-2007年人口密度呈现阶段性减少,2015年以后人口密度基本稳定在86.44人/ km^2 左右。从空间分布格局来看,陕南秦巴山区高人口密度(>150 人/ km^2)主要分布在研究中部的汉中盆地、西乡盆地、安康盆地、汉阴盆地,以及研究区东北部的商丹盆地等地(图4),占研究区总面积的18.20%。低人口密度(<10 人/ km^2)主要分布于研究区北部和南部的高山地区,占研究区总面积的18.20%。从空间变化趋势来看,59.19%区域人口密度呈现减少趋势,中心城区人口密度显著增加,而其外围区域人口密度显著减少,形成典型的“中心-外围”格局,人口集聚化特

征显现。

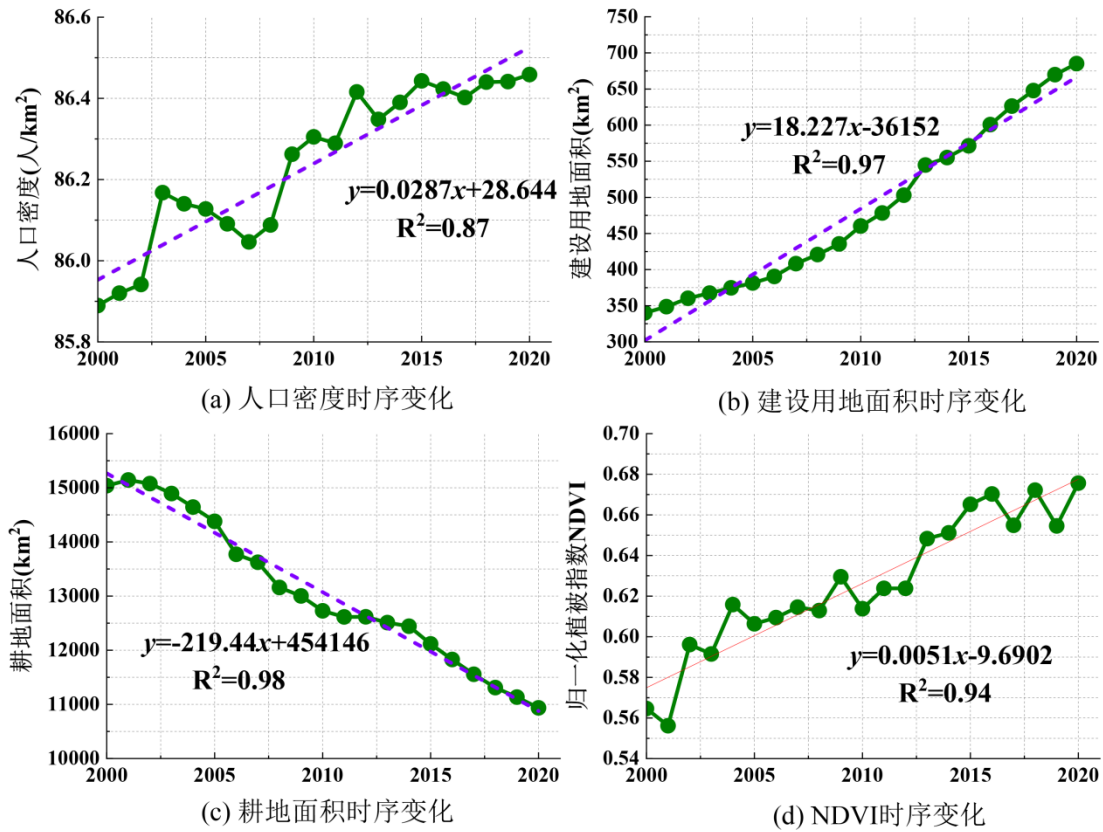


图3 2000-2020年陕南秦巴山区人地系统要素时序变化

Fig. 3 Temporal changes of human-earth system elements in southern Shaanxi from 2000 to 2020

2000-2020年陕南秦巴山区建设用地面积呈显著扩张趋势,而耕地面积呈显著减少趋势(图3),其中建设用地面积占比从2000年0.48%增加到2020年0.98%,扩张了345.12 km²,而耕地面积占比从21.44%缩减到15.59%,缩减了4103.06 km²。建设用地扩张主要来源为占用耕地,21年间耕地向建设用地转移352.56 km²,主要分布于汉台区、汉滨区、城固县、南郑区和勉县等经济发展水平较高区域(图4)。受退耕还林还草及快速城镇化影响,耕地主要转换为林地、建设用地和草地。其中耕地向林地转移4957.97 km²,主要分布于汉滨区、旬阳县、宁强县、紫阳县和西乡县。耕地向草地转移141.87 km²,主要分布于山阳县、商州区和洛南县。

在秦巴山区实施退耕还林、封山育林、植树造林等一系列生态工程背景下,陕南地区年均NDVI从2000年0.56增长为2020年0.68(图3),植被覆盖明显提升。NDVI大于0.6主要分布于中北部的秦岭山地区以及南部的大巴山地区(图4),主要植被类型为阔叶林、灌丛和草丛,植被长势较

好。NDVI低于0.5主要分布于汉江、丹江等河谷盆地,主要为耕地上的粮食作物和经济作物等栽培植物,植被较为稀疏。从空间变化趋势来看,98.09%区域植被覆盖呈增加趋势,研究区西部、东北部和中东部NDVI年均增长速率大于0.06/10a,植被覆盖提升幅度较大。

3.2 “人”、“地”子系统的时空演变

根据人类活动强度分布态势和研究区实际情况,将人类活动强度划分为低[0, 2)、较低[2, 5)、中等[5, 10)、较高[10, 20)和高[20, 100]五个等级。研究区人类活动以低强度为主,可占总面积的60%以上,主要分布于秦岭山地的西部和中部以及大巴山地中部和东南部的高海拔区域(图5)。仅5%区域人类活动处于高强度等级,主要分布在秦岭山地的东北部和汉江盆地区。随着人口和经济的集聚化发展,陕南秦巴山区低强度、较高强度和低强度等级面积均呈增加趋势,而较低强度和中等强度等级面积呈减少趋势。2000-2020年,41.83%的区域人类活动强度呈现增加趋势,主要分布在人类活动强度高值区。45.56%

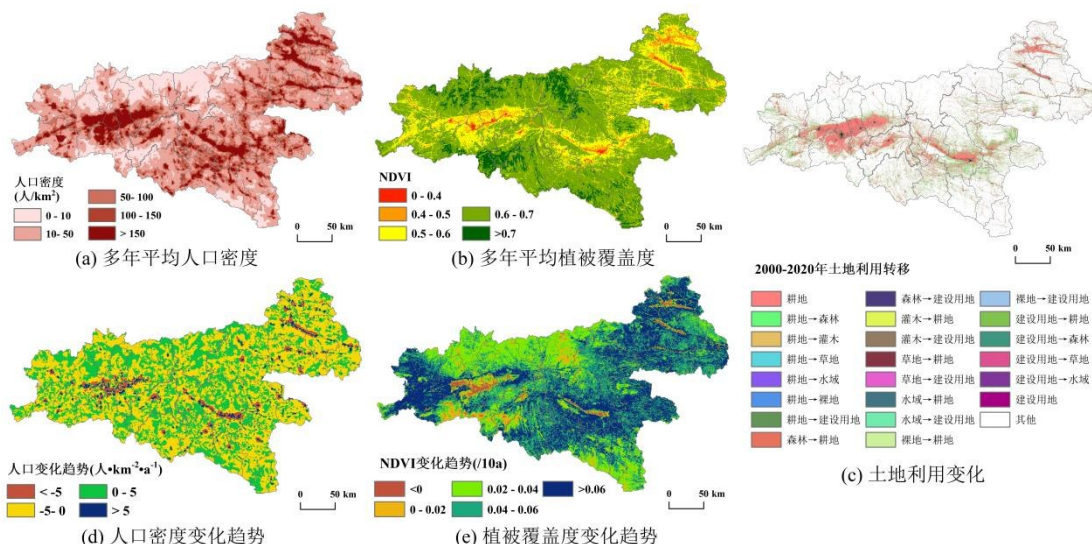


图4 2000-2020年陕南秦巴山区人地系统要素空间变化

Fig. 3 Spatial changes of human-earth system elements in southern Shaanxi from 2000 to 2020

区域人类活动强度呈显著减少趋势,主要分布于人类活动的低强度区。这说明陕南地区人类活动对地表的改造从无规划的大范围开发向有规划的特定区域开发转变。

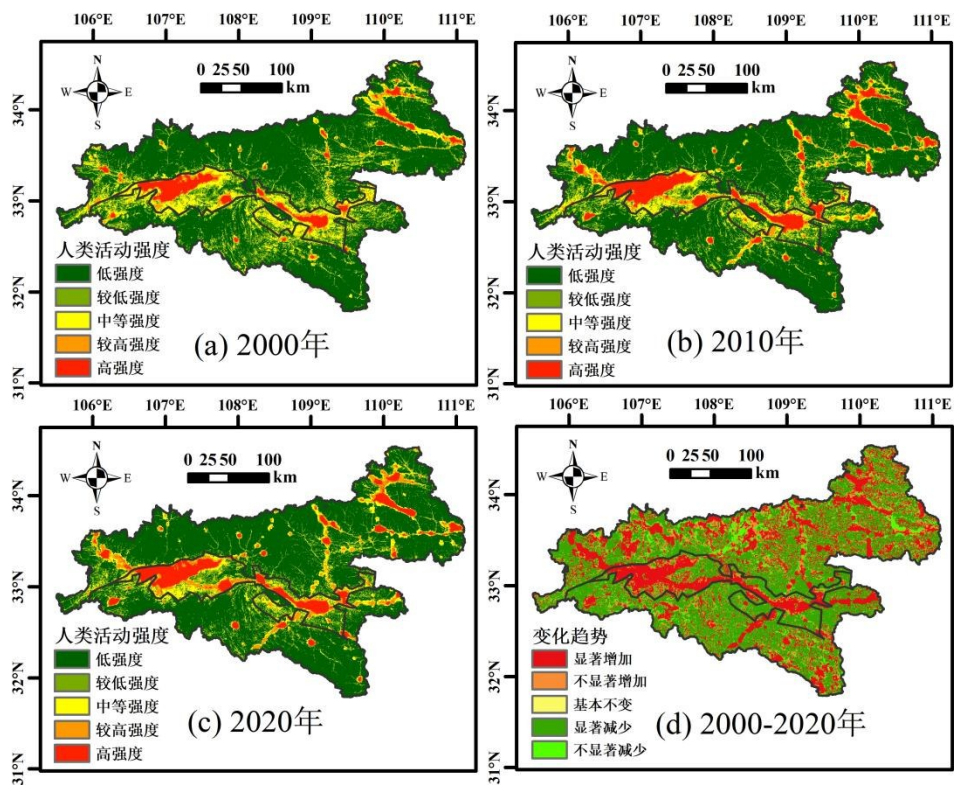


图5 陕南秦巴山区人类活动强度空间变化

Fig. 5 Spatial changes of human activity intensity in Southern Shaanxi

基于研究区自然环境的分布态势,将自然环境状况划分为差[0, 30)、一般[30, 40)、好[40, 50)和极好[50, 100]四个等级。作为重要的生态屏障和生态保护区,陕南秦巴山区自然环境以好和极好等级为主(图6),可占研究区总面积的

70%以上。且多年来呈扩张趋势,从2000年的71.27%增加到2020年的81.59%。差的自然环境主要分布于汉台区、城固县和洛南县,该区域地势平坦,为人口集聚区和工业区,对自然环境的破坏较大。2000-2020年,陕南秦巴山区自然环境变

化趋势总体以改善为主,占总面积的78.72%。28.53%区域呈现显著好转,主要分布于研究区西部的略阳县和宁强县,以及东北部的洛南县和商州区。这些区域气候湿润化,植被覆盖大幅提升,

自然环境明显好转。自然环境呈不显著恶化区占总面积的17.39%,主要分布于研究区东南部的岚皋县、平利县和镇坪县。

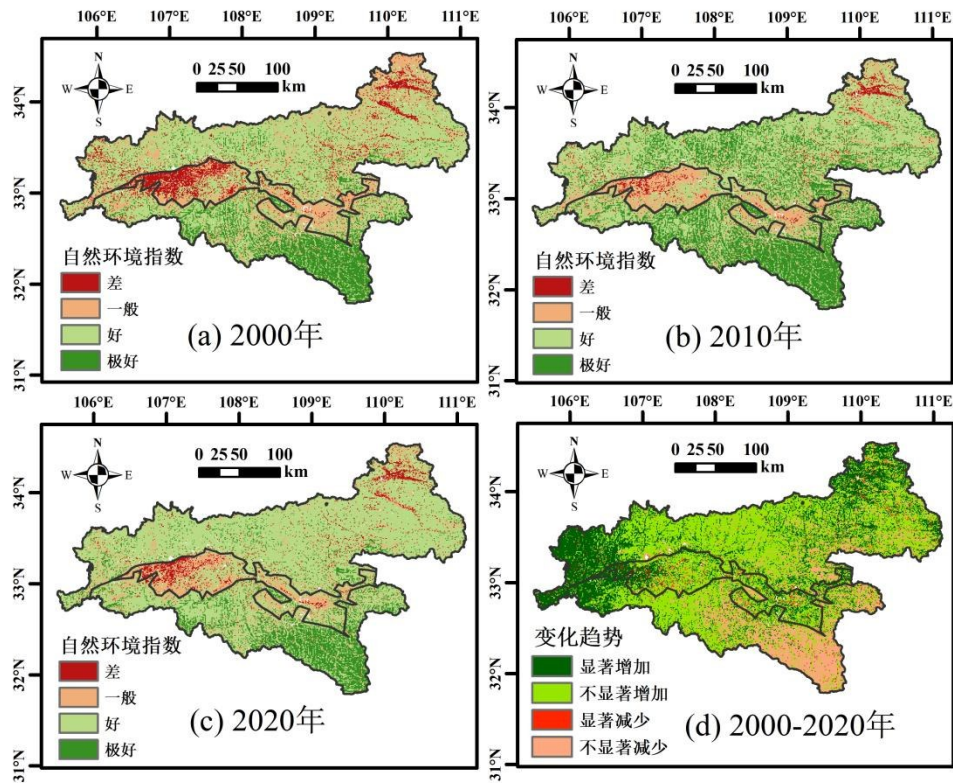


图6 陕南秦巴山区自然环境指数空间变化

Fig. 6 Spatial changes of natural environment index in Southern Shaanxi

3.3 人地系统耦合度和协调度的时空演变

陕南秦巴山区人地系统耦合度C整体不高,多年平均值仅为0.35,表明人地系统位于拮抗耦合状态。人地系统耦合度呈现“南北低中部高、城区高外围低”的空间分布格局(图7)。研究区人地系统主要呈现为低度耦合,2000-2020年低度耦合面积占比从52.42%增加到58.04%。高强度耦合主要分布于汉江盆地、研究区东北部的商丹盆地以及各区县的中心城区,这些区域人地交互作用强烈,约占研究区总面积的11%。较高耦合面积呈缩减趋势,从2000年19.73%缩减为2020年15.22%,主要分布于高强度耦合外围。陕南28区县人地系统耦合度C值范围为[0.11,0.75],表明各区县人地系统耦合差异较大,形成以汉台区为单核心的单极化格局(图8),同时辐射带动汉滨区、汉阴县和商州区等拮抗耦合县区。相对而言,宁陕县、镇坪县和留坝县受地形地貌和生态环境保护约束,人地系统仍处于低度耦合的落后

梯度,人地交互作用强度低。商南县人地系统实现了从低度耦合向拮抗耦合的一级跨越,汉滨区和汉阴县人地系统由较高耦合转变为拮抗耦合,宁强县、旬阳县虽耦合等级未发生变化,但耦合度C值明显下降。

陕南秦巴山区人地系统耦合协调度D多年平均值仅为0.264,处于濒临失调阶段,表明自然环境与人类活动之间没有形成相互促进的协同发展趋势,整体效益水平较低。研究区人地系统主要呈现为严重失调和濒临失调,两者面积占比之和可达80%。2000-2020年严重失调面积占比从38.37%扩张为43.07%,主要分布在秦岭山地区中部及大巴山地区的东南部(图7)。濒临失调面积占比从2000年47.44%缩减为2020年38.86%,缩减区主要位于研究区西北部和东北部。人地系统中级协调主要位于各县区中心城区,面积占比从0.45%增加到3.08%,这些区域在实现经济快速发展的同时,较少破坏自然环境

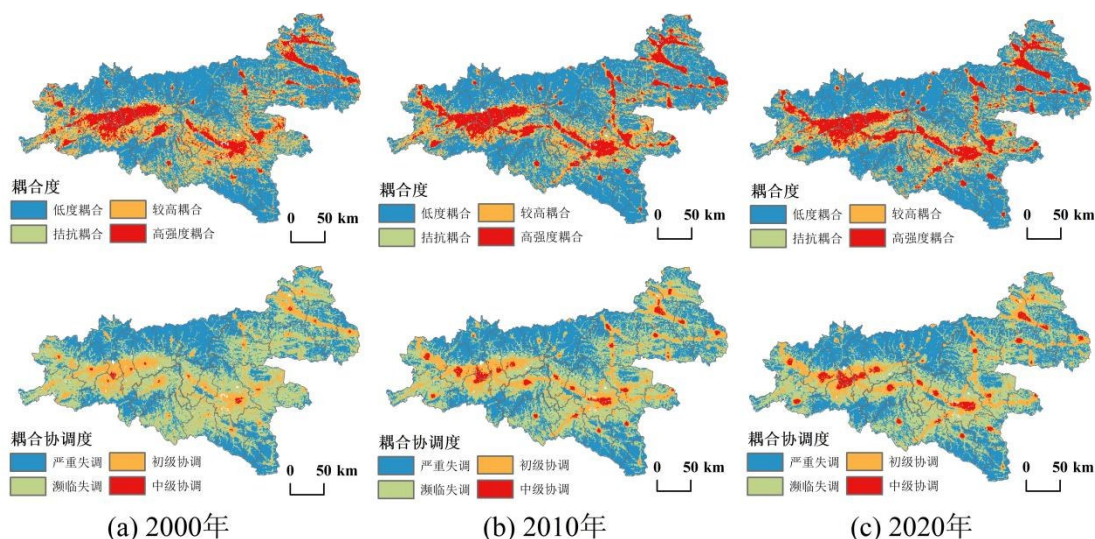


图7 陕南秦巴山区人地系统耦合度和协调度空间变化

Fig. 7 Spatial changes in the coupling degree and coordination degree of human-earth system

条件。初级协调主要沿中级协调向外辐射的条带状分布,约占研究区总面积的14%。陕南28区县人地系统耦合协调度呈现“两头少中间多”的正态分布,仅汉台区人地系统呈现初级协调,宁陕县、

镇坪县、留坝县和佛坪县4个县域人地系统呈严重失调,其余23区县人地系统均呈现濒临失调状态(图8)。从时间序列上,各区县人地系统耦合协调度D变化幅度均较小,绝对值均低于0.04。

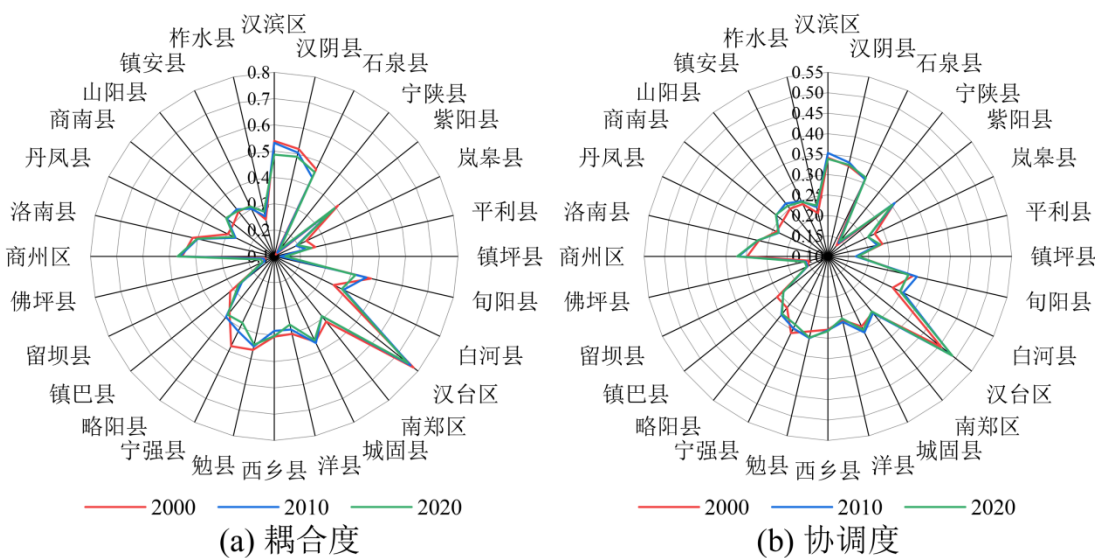


图8 陕南秦巴山区县域人地系统耦合度和协调度时间变化

Fig. 8 Temporal changes in the coupling degree and coordination degree of human-earth system at the county scale

4 人地系统交互作用的耦合机制

4.1 人地系统间相关关系分析

运用 ArcGIS 工具以 500 m 为格网提取各人地要素和子系统数值,采用 SPSS 软件进行 Pearson 相关系数法分析人地系统间的动态变化特征。从图9可知,仅产水量、气温与各人类指标呈现正相关,其余自然指标与人类指标均表现为负相关。

产水量与各人类指标的正相关程度均较弱($r < 0.2$)。气温与耕地面积占比的正相关程度最强($r > 0.49$),其次为人类活动强度($r > 0.39$)。2000-2020年,气温与耕地面积占比的正相关程度逐渐减轻,而与建设用地面积占比正相关程度逐渐增强。与其余自然指标相比,生境质量与各人类指标的负相关程度最强($0.2 < |r| < 0.7$)。随着时间的推移,生境质量与耕地面积占比的负相关程度逐

渐减轻,而与其他人类指标的负相关程度逐渐增强。如生境质量与建设用地面积占比相关系数从2000年-0.22减少为-0.34,与CO₂排放量相关系数从-0.34减少为-0.41。植被净初级生产力、土壤保持量与各人类指标的负相关程度相对较低(-0.3<r<-0.08)。21年间,植被净初级生产力与各人类指标的负相关程度逐渐减轻,其中与人口密度的相关系数从-0.12增长为-0.08。土壤保持与人类指标中的耕地面积占比负相关程度最强,

可达-0.28,与建设用地面积占比相关系数从2000年-0.09减少为-0.12。自然环境指数与人类指标中的耕地面积占比负相关程度最强(-0.47<r<-0.44),其次为人类活动强度(r=-0.39)和CO₂排放量(-0.30<r<-0.28)。随着时间的推移,自然环境指数与建设用地面积占比负相关程度逐渐增强,相关系数由2000年-0.17减少为2020年-0.25。

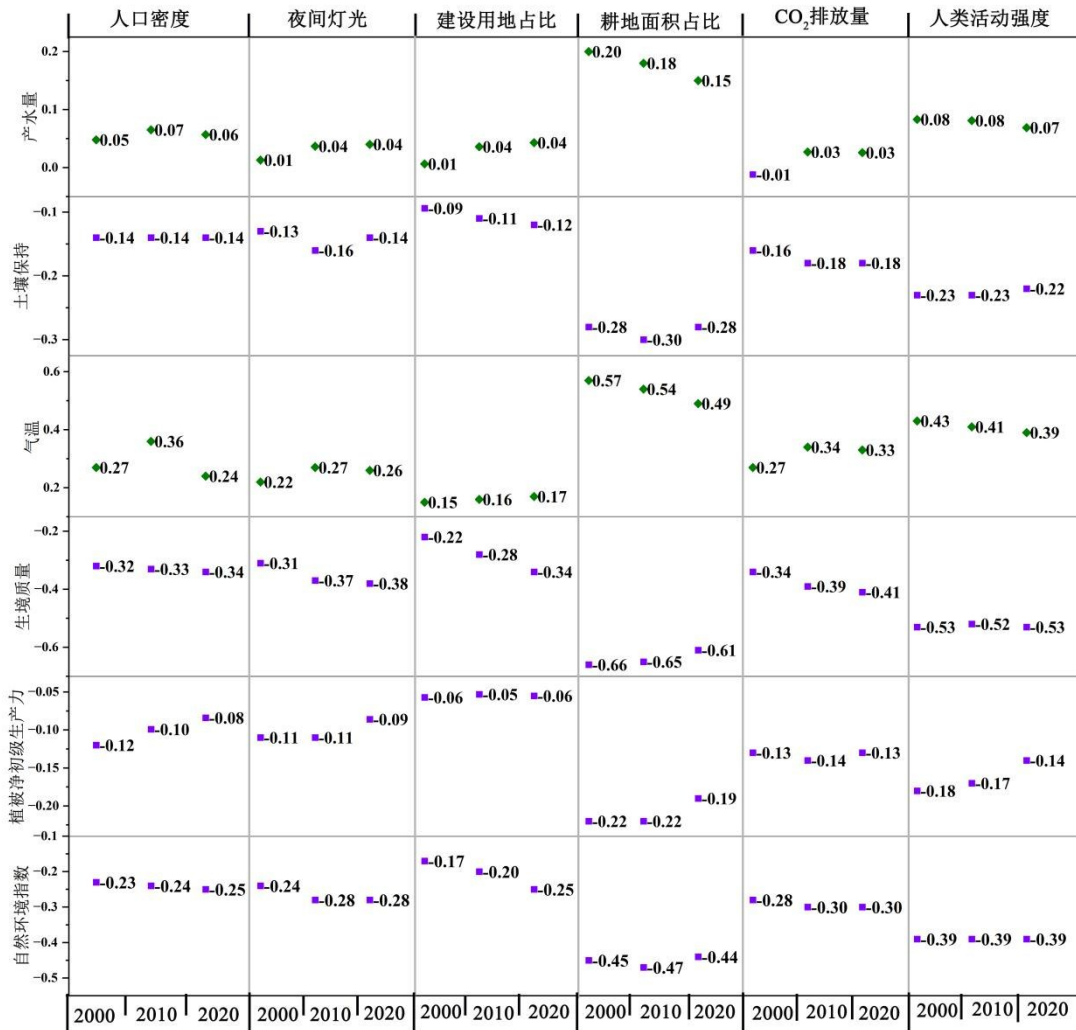


图9 陕南秦巴山区人地系统间相关关系变化

Fig. 9 Temporal change in the correlation coefficients of human-earth system

4.2 人地系统交互作用的空间异质性分析

人口密度对自然环境指数的影响以负向为主,仅34.03%区域人口密度对自然环境为正面影响(图10),一方面可能与人口集聚所带来的资源利用率提升有关,如土地和水资源集约化管理和高效化利用;同时人口规模的扩大可能会促进生态保护意识的提升、技术研发与创新、有效的管

理模式等,这些均会发挥人口对自然环境的正向作用。夜间灯光在90.45%区域对自然环境指数为负向效应,其中负向效应较强(回归系数<-0.2)的主要分布于西乡县西部和中部、洋县北部和中部、城固县北部。研究区南部和西部部分地区夜间灯光对自然环境指数为正向影响,这些区域通过发展生态型产业与旅游业等绿色经济模式,

在推动经济发展的同时有效改善区域自然环境,实现生态保护与经济协同。建设用地面积占比对自然环境指数的影响在 83.76% 区域为消极作用,其中汉中盆地和西乡盆地南北两侧的负向效应最强,回归系数小于-0.4。78.55% 区域耕地面积占比对自然环境指数为消极作用,正向作用主要分布于各县区行政边界的周围。CO₂排放

对自然环境的影响在 91.05% 区域表现为负向,其中正向影响与夜间灯光较为相似,主要分布于研究区南部和西部的小部分地区。人类活动强度这一综合指数对自然环境指数的影响在 77.68% 区域表现为消极作用,正向作用分布较为零散化和斑块化。

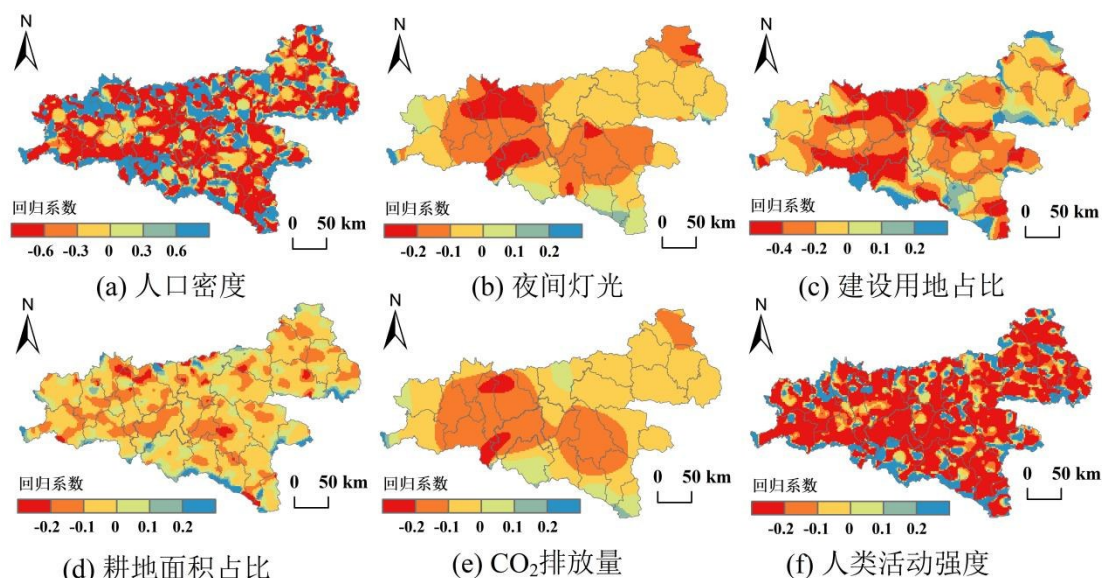


图 10 人类各变量对自然环境指数的作用程度

Fig. 10 Influencing degree of human variable to natural environment index

产水量和气温分别在 71.00% 和 95.18% 区域对人类活动强度影响为正向(图 11),这表明充足的水资源和适宜的气候条件为人类居住与社会经济发展提供了有利的基础环境支撑。其中,气温的正向效应在河谷盆地及中心城区最为显著,回归系数普遍高于 0.4。土壤保持与人类活动强度在 80.21% 区域为负相关,其中负向效应较强(回归系数小于-0.4)的主要分布于秦岭山地东北部和汉江盆地。该区域为耕地分布的集中区与人类活动的活跃区,过度开垦耕地会削弱土壤保持水平,导致水土流失和土壤养分流失。95.65% 区域生境质量与人类活动强度呈负相关,其中以汉中市五大平川县、汉滨区、高州区为核心的三大组团负向效应最强,回归系数小于-0.3。这些区域为社会经济发展核心区,高强度人类活动破坏了生态链完整性,降低了生境适宜度。植被净初级生产力对人类活动强度的影响较为复杂,正负效应面积占比分别为 47.77% 和 52.23%,反映出植被与人类的交互机制存在明显的地域差异性。自然环境指数对人类活动强度的影响在 67.07% 区域为负面效应为主,其中负向效应较强(回归系数

小于-0.6)的主要分布于除岚皋县和镇坪县的其余 26 县区的核心城区,说明人类活动强度较高的地区往往伴随着更为明显的自然环境压力。

5 结论与讨论

5.1 结论

本文创新点和贡献包括:在格网尺度上剖析了陕南秦巴山区人地系统耦合协调水平,揭示了人地系统交互作用的空间异质性。主要结论如下:

(1)陕南秦巴山区人口密度、建设用地面积占比和 NDVI 在 2000-2020 年均呈上升趋势,而耕地面积占比呈缩减趋势。21 年间人口呈现往中心城区集聚的特征,耕地主要转移为林地、建设用地和草地,植被覆盖在 98.09% 区域呈现增加趋势。

(2)陕南地区人类活动以低强度为主,可占总面积的 60% 以上,随着时间的推移,人类活动从无规划的大范围开发向有规划的特定区域开发转变。自然环境在 70% 以上区域呈现好和极好等级,且 78.72% 面积自然环境呈好转趋势。

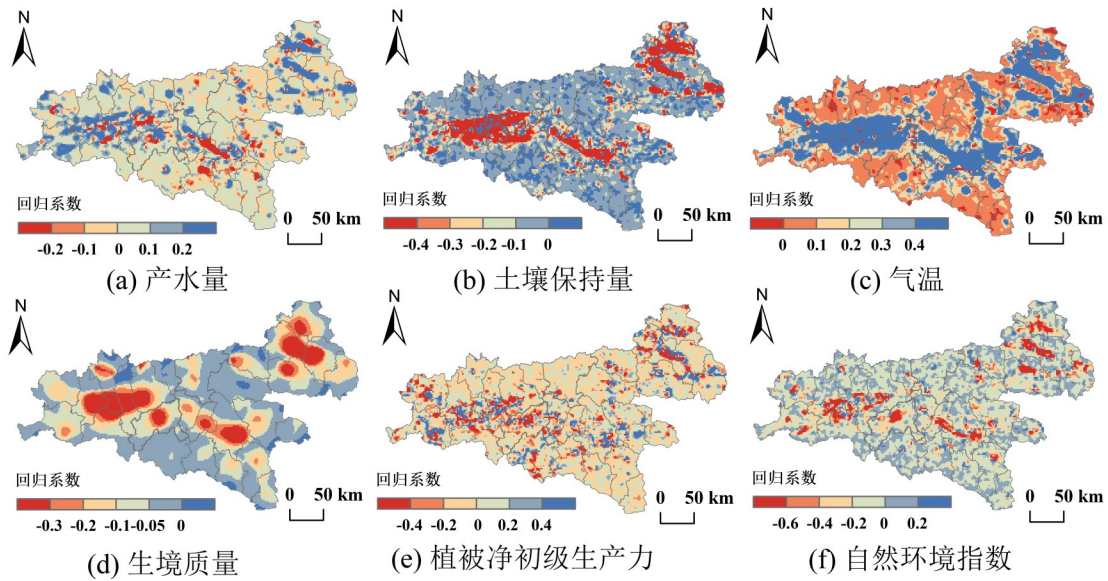


图 11 自然环境各变量对人类活动强度的作用程度

Fig. 11 Influencing degree of natural variable to human activity intensity

(3)人地系统耦合度和协调度均较低,多年平均值分别为0.35和0.26。耦协调类型以严重失调和濒临失调为主,两者面积占比之和可达80%。区县尺度上,人地系统耦合度呈现以汉台区为核心的单极化特征,协调度呈现“两头少中间多”的正态分布。

(4)2000-2020年各自然指标与耕地面积占比的相关程度逐年减轻,而与建设用地面积占比的相关程度逐年增强。人地系统交互作用具有明显的空间异质性,仅产水量和气温在70%以上区域对人类活动强度影响为正向,其余人地系统交互作用均在50%以上区域为负向效应。

5.2 讨论

从研究结果来看,陕南秦巴山区人地系统耦合度和协调度整体较低,生态保护与经济发展之间难以形成相互促进、整体增益的良性发展局面。位于秦岭南麓的宁陕县、留坝县,以及位于大巴山北坡的镇坪县,人地系统耦合度和协调度位于陕南28区县末位,这些地区虽具有较高的植被覆盖度、土壤保持、生境质量和水源涵养能力,但受制于地形地貌、交通条件、产业基础和市场距离等因素,难以将优质的生态资源通过市场化路径转化为区域经济发展的核心竞争力。这种自然生态供给与社会经济需求之间的空间错配与结构性失衡,导致自然与人类耦合关系的失调,成为制约人地系统协调与可持续发展的关键瓶颈。未来应该在注重森林、水源和生物多样性等生态系统保护的基础上,探索乡村旅游、林下经济、稻渔综合养

殖、有机农业等生态产业化发展路径,创新生态补偿的模式,推展多元化补偿方式,以“双碳”目标为牵引,将碳交易、碳汇等作为推动生态产品价值实现的重要抓手。河谷盆地和中心城区的人地系统耦合度和协调度水平较高,人地交互作用强烈,整体协同效应较强。但其人类活动强度较高而生态环境水平较低。未来应在经济发展的同时,加强对生态保护的反哺机制,推动技术创新和产业转型升级,打造绿色循环的产业体系,减少经济发展对生态环境的不利影响,注重城市公园和街道绿地建设,创建生态优美、宜居宜业的园林城市,确保生态环境质量得到有效提升。

本研究发现产水量与各人类指标呈现较弱的正相关,这主要是因为降水、地形、土壤深度等自然因素对产水的影响远大于人类活动^[40]。而建设用地扩张、退耕还林等人类活动,会改变地表渗透性和植被截留能力,从而对产水量产生一定的影响^[41]。气温与人类活动呈现显著正相关,特别在河谷盆地和中心城区正向促进作用最强,该区域主要土地利用类型为耕地和建设用地,为人口密集区和经济核心区。王莹书等^[42]发现建设用地、未利用地、耕地相比较林地具有更强的保温和增温效果。纪王迪等^[43]在关中地区研究发现,夜间灯光强度、人口密度、建设用地面积占比对地表温度的具有显著正向驱动作用。土壤保持、生境质量和植被净初级生产力这3个生态变量与人类活动强度呈显著负相关,这与其他研究结果基本一致^[44, 45]。

突破传统以行政区为研究单元,以统计数据为主要数据来源的宏观研究,将生态系统服务融入自然环境指数计算,将土地利用、夜间灯光、CO₂排放量等遥感数据应用于人类活动强度综合评估,实现人地系统格网化和精细化模拟。尽管指标体系力求完备,但人地系统复杂多变,牵扯要素繁多,部分数据难以获取和量化,导致指标体系仍具有一定的局限性。未来应利用新兴的地理空间数据和大数据,借助复杂地理过程模型与机器学习算法,引入近远程耦合框架深入挖掘人地关系多尺度特征和耦合机理。

参考文献:

- [1] 吴传钧. 论地理学的研究核心——人地关系地域系统[J]. 经济地理, 1991, 11(03): 1-6.
WU C J. The core of study of geography: Man-land relationship areal system [J]. Economic Geography, 1991, 11(03): 1-6.
- [2] ROCKSTROM J, STEFFEN W, Kevin N, et al. A safe operating space for humanity [J]. Nature, 2009, 461(7263): 472-475.
- [3] FU B J, WU X T, WANG S, et al. Scientific principles for accelerating the Sustainable Development Goals [J]. Geography and Sustainability, 2024, 5(2): 157-159.
- [4] 熊巨华, 王佳, 张晴, 等. 地理科学的学科体系构建与内涵[J]. 科学通报, 2021, 66(02): 153-161.
XIONG J H, WANG J, ZHANG Q, et al. The construction of discipline system of science of geography and its significance [J]. Chinese Science Bulletin, 2021, 66(02): 153-161.
- [5] 刘彦随, 夏军, 王永生, 等. 黄河流域人地系统协调与高质量发展[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2022, 52(03): 357-370.
LIU Y S, XIA J, WANG Y S, et al. Coordinated human-earth system and high-quality development in Yellow River Basin [J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2022, 52(03): 357-370.
- [6] 刘彦随. 现代人地关系与人地系统科学地理科学[J]. 地理科学, 2020, 40(08): 1221-1234.
LIU Y S. Modern human-earth relationship and human-earth system science [J]. Scientia Geographica Sinica, 2020, 40(08): 1221-1234.
- [7] 左文洁, 李玉恒, 杜国明, 等. 基于县域尺度的黑龙江省乡村人地系统耦合测度及其时空演化分析[J]. 水土保持研究, 2025, 32(1): 347-357.
ZUO W J, LI Y H, DU G M, et al. Coupling measure and spatial-temporal evolution analysis based on county scale of human and land system in Heilongjiang province [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(1): 347-357.
- [8] LIU H M, CHENG Y, LIU Z F, et al. Conflict or Coordination? The Spatiotemporal Relationship Between Humans and Nature on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Earth's Future, 2023, 11(9): e2022EF003452.
- [9] ZHAO Y, LI Y Z, LIU Y S, et al. Evolution of rural human-earth system in midstream of China's Yellow River and its implications for land use planning: A study of Lingbao County, Henan Province [J]. Land Use Policy, 2025, 150: 107475.
- [10] 汪荣, 李阳兵, 邵景安, 等. 2000—2020年三峡库区腹地人地耦合土地系统演变机制[J]. 农业工程学报, 2024, 40(10): 255-264.
WANG R, LI Y B, SHAO J A, et al. Evolution mechanism for human-land coupling land system in the hinterland of the Three Gorges Reservoir Area from 2000 to 2020 [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(10): 255-264.
- [11] 方创琳, 崔学刚, 梁龙武. 城镇化与生态环境耦合圈理论及耦合器调控[J]. 地理学报, 2019, 74(12): 2529-2546.
FANG C L, CUI X G, LIANG L W. Theoretical analysis of urbanization and environment coupling coil and coupler control [J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(12): 2529-2546.
- [12] 龙花楼, 马历, 周贵鹏. 中国土地利用转型研究进展与展望[J]. 地理学报, 2025, 80(08): 1993-2015.
LONG H L, MA L, ZHOU G P. Land use transition in China: Progress, challenges and prospect [J]. Acta Geographica Sinica, 2025, 80(08): 1993-2015.
- [13] ZHANG X, GENG Y, SHAO S, et al. Decoupling PM_{2.5} emissions and economic growth in China over 1998 - 2016: A regional investment perspective [J]. Science of The Total Environment, 2020, 714: 136841.
- [14] 朱肖勇, 付占辉, 乔家君, 等. 黄河流域城镇人口和用地变化的关联格局及地域类型[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2024, 54(03): 450-460.
ZHU X Y, FU Z H, QIAO J J, et al. The correlation pattern and regional types of urban population and use changes in the Yellow River Basin [J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2024, 54(03): 450-460.
- [15] 任远, 倪泽睿. 我国城镇化协调发展的空间状况及影响因素[J]. 中国名城, 2025, 39(01): 17-25.

- REN Y, NI Z R. The Spatial Situation and Influencing Factors of the Coordinated Development of Urbanization in China [J]. *China ancient city*, 2025, 39(01): 17-25.
- [16] KARRI R R, RAVINDRAN G, PINGILI V, et al. Integrating the Food-Energy-Water Nexus: Strategies for climate change mitigation with SDG alignment [J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2026, 116: 108070.
- [17] ZHOU T, CHEN W X, WANG Q, et al. Urbanisation and ecosystem services in the Taiwan Strait west coast urban agglomeration, China, from the perspective of an interactive coercive relationship [J]. *Ecological Indicators*, 2023, 146: 109861.
- [18] 武燕, 吴映梅, 高彬焱, 等. 滇中城市群生态系统服务与人类福祉时空耦合及影响因素研究 [J]. *地域研究与开发*, 2025, 44(03): 135-145+174.
- WU Y, WU Y M, GAO B P, et al. Spatio-temporal Coupling and Influencing Factors of Ecosystem Services and Human Well-being in the Central Yunnan Urban Agglomeration [J]. *Areal research and development*, 2025, 44(03): 135-145+174.
- [19] 李文龙, 匡文慧, 吕君, 等. 北方农牧交错区人地系统演化特征与影响机理——以内蒙古达茂旗为例 [J]. *地理学报*, 2021, 76(02): 487-502.
- LI W L, KUANG W H, LU J, et al. Adaptive evolution mechanism of rural human-land system in farming-and-pastoral areas of northern China [J]. *Acta geographica sinica*, 2021, 76(02): 487-502.
- [20] 刘彦随, 冯巍仑, 李裕瑞. 现代农业地理工程与农业高质量发展——以黄土丘陵沟壑区为例 [J]. *地理学报*, 2020, 75(10): 2029-2046.
- LIU Y S, FENG W L, LI Y R, et al. Modern agricultural geographical engineering and agricultural high-quality development: Case study of loess hilly and gully region [J]. *Acta geographica sinica*, 2020, 75(10): 2029-2046.
- [21] LI Y R, LI Y, FAN P C, et al. Impacts of land consolidation on rural human - environment system in typical watershed of the Loess Plateau and implications for rural development policy [J]. *Land Use Policy*, 2019, 86: 339-350.
- [22] 白舒婷, 王珊, 迟文峰, 等. 2000—2023年科尔沁沙地植被NDVI时空动态及其对气候变化和人类活动的响应 [J]. *干旱区资源与环境*, 2025, 39(07): 74-83.
- BAI S T, WANG S, CHI W F, et al. Spatiotemporal dynamics of vegetation NDVI and its responses to climate exchange and human activities in the Horqin Sandy Land from 2000 to 2023 [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2025, 39(07): 74-83.
- [23] WANG L, LI Y, BISWAS A, et al. Assessing climate change and human impacts on runoff and hydrological droughts in the Yellow River Basin using a machine learning-enhanced hydrological modeling approach [J]. *Journal of Environmental Management*, 2025, 380: 125091.
- [24] MUMTAZ F, LI J, LIU Q H, et al. A comprehensive framework for evaluating ecosystem quality changes and human activity contributions in Inner Mongolia and Xinjiang, China [J]. *Land Use Policy*, 2025, 151: 107494.
- [25] 董格, 张中华, 王帅, 等. 黄河流域资源-人口-产业高质量发展的耦合协调及影响因素分析 [J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 2024, 54(03): 434-449.
- DONG G, ZHANG Z H, WANG S, et al. Coupling coordination and influencing factors analysis of high-quality development of "resource-population-industry" in the Yellow River Basin [J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 2024, 54(03): 434-449.
- [26] HUANG J X, LIU W Y, YANG S Q, et al. Exploring the coupling and coordination characteristics, influencing factors, and ecological management zoning of ecosystem services and urbanization: A case study of the Yangtze River Economic Belt [J]. *Ecological Frontiers*, 2025, 45(4): 1042-1056.
- [27] 李君轶, 傅伯杰, 孙九林, 等. 新时期秦岭生态文明建设: 存在问题与发展路径 [J]. *自然资源学报*, 2021, 36(10): 2449-2463.
- LI J Y, FU B J, SUN J L, et al. Ecological civilization construction at Qinling Mountains in the New Era [J]. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(10): 2449-2463.
- [28] 杨晓娟, 杨永春, 肖宁, 等. 陕南秦巴山深度贫困地区中小城市“三生空间”优化策略研究——以陕西省略阳县为例 [J]. *中国名城*, 2020, (06): 10-17.
- YANG X J, YANG Y C, XIAO N, et al. Research on optimization strategies of "three basic spaces" in small and medium-sized cities of deeply impoverished areas in Qinling-Daba Mountains, Southern Shanxi: A case study of Lüeyang County, Shaanxi Province [J]. *China Ancient City*, 2020, (06): 10-17.
- [29] LI R Y, CHEN J, YANG X J, et al. The impact of population change on social-ecological systems' vulnerability: A case of the Qinling-Daba Mountains of Southern

- Shaanxi in China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 476: 143682.
- [30] MA Q, ZHOU M Q, LIU J C, et al. Coupling Relationship between Ecosystem Service Value and Socioeconomic Development in the Qinba Mountains, China [J]. *Diversity*, 2022, 14(12): 1105.
- [31] 余玉洋, 李晶. 秦巴山区生态系统服务供需与人类活动强度的时空变化及其耦合关系[J]. *生态学报*, 2024, 44(19): 8764-8773.
- YU Y Y, LI J. Spatio-temporal changes of ecosystem service supply and demand and human activity intensity in Qinling-Daba Mountains and its coupling relationship [J]. *Acta Ecologica sinica*, 2024, 44(19): 8764-8773.
- [32] AN Q M, YUAN X F, ZHANG X R, et al. Spatio-temporal interaction and constraint effects between ecosystem services and human activity intensity in Shaanxi Province, China [J]. *Ecological Indicators*, 2024, 160: 111937.
- [33] DANG H, LV Y H, WANG X F, et al. Integrating species diversity, ecosystem services, climate and ecological stability helps to improve spatial representation of protected areas for quadruple win [J]. *Geography and Sustainability*, 2025, 6(1): 100205.
- [34] 骆军强, 张子宁, 张培蕾, 等. 中国都市圈人地关系演变中的城镇化与生态环境质量耦合 [J]. *资源科学*, 2025, 47(02): 281-293.
- LUO J Q, ZHANG Z N, ZHANG P L, et al. Coupling of urbanization and eco-environmental quality in the evolution of human-environment relationships in China's metropolitan regions [J]. *Resources Science*, 2025, 47(2): 281-293.
- [35] 刘庆芳, 杨定, 杨振山, 等. 青藏高原国家公园群人文生态系统耦合协调评价及障碍因子识别 [J]. *地理学报*, 2023, 78(05): 1119-1135.
- LIU Q F, YANG D, YANG Z S, et al. Evaluation of coupling coordination and identification of obstacle factors of human ecosystem in Qinghai-Tibet Plateau National Park Cluster [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2023, 78(05): 1119-1135.
- [36] 李茂娟, 李天奇, 朱连奇, 等. 基于袋状图和相关系数的太行山地生态系统服务权衡/协同关系分析 [J]. *生态学报*, 2025, 45(13): 1-12.
- LI M J, LI T Q, ZHU L Q, et al. The trade-offs and synergistic relationships among ecosystem services based on bagplots and correlation coefficients: a case study in Taihang Mountains [J]. *Acta Ecologica sinica*, 2025, 45(13): 1-12.
- [37] WANG Q, BAI X P. Spatiotemporal characteristics of human activity and land use on ecosystem service functions in mountainous areas of Northeast Guizhou, Southwest China [J]. *Ecological Engineering*, 2025, 212: 107473.
- [38] NAKAYA T. Local spatial interaction modelling based on the geographically weighted regression approach [J]. *GeoJournal*, 2001, 53(4): 347-358.
- [39] 李梦冉, 徐小任, 王梁, 等. 黄河流域农业碳排放时空变化特征及影响因素分析 [J]. *干旱区地理*, 2025, 48(05): 854-865.
- LI M R, XU X R, WANG L, et al. Spatial-temporal characteristics and influencing factors of agricultural-carbon emissions in the Yellow River Basin [J]. *Arid Land Geography*, 2025, 48(05): 854-865.
- [40] FANG L L, WANG L C, CHEN W X, et al. Identifying the impacts of natural and human factors on ecosystem service in the Yangtze and Yellow River Basins [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 314: 127995.
- [41] 王修文, 于书霞, 史志华, 等. 南方红壤区生态系统服务权衡与协同关系演变对退耕还林的响应 [J]. *生态学报*, 2021, 41(17): 7002-7014.
- WANG X W, YU S X, SHI Z H, et al. Responses of tradeoffs and synergies among ecosystem services to Grain-for-Green Project in the red soil region, southern China [J]. *Acta Ecologica sinica*, 2021, 41(17): 7002-7014.
- [42] 王莹书, 石培基, 赵武生, 等. 兰州市热环境时空特征及影响因素研究 [J]. *生态科学*, 2022, 41(02): 59-65.
- WANG Y S, SHI P J, ZHAO W S, et al. Spatial-temporal characteristics and influencing factors of thermal environment in Lanzhou [J]. *Ecological Science*, 2022, 41(02): 59-65.
- [43] 纪王迪, 黄晓军, 包微, 等. 关中地区人类活动强度与地表温度的时空关联特征及其驱动作用 [J]. *干旱区地理*, 2024, 47(06): 967-979.
- JI W D, HUANG X J, BAO W, et al. Spatiotemporal correlation characteristics and driving forces of human activity intensity and surface temperature in the Guanzhong area [J]. *Arid Land Geography*, 2024, 47(06): 967-979.
- [44] CHEN S J, YAN J H, WANG Y P, et al. Analysis of Spatio-Temporal Relationship Between Ecosystem Services and Human Footprints Under Different Human Activity Gradients: A Case Study of Xiangjiang River Basin [J]. *Remote Sens*, 2024, 16(22): 4212.
- [45] ZHAO Y H, QU Z, ZHANG Y, et al. Effects of hu-

man activity intensity on habitat quality based on nighttime light remote sensing: A case study of Northern Shaanxi, China[J]. Science of The Total Environ-

ment, 2022, 851(1): 1587037.

)