

https://doi.org/10.3799/dqkx.2024.134



秦岭北麓(西安段)人类活动与生态环境互馈的海拔梯度特征

王 瑞^{1,3,4}, 申艳军^{2,3,4,5*}, 王 磊¹, 李少杰¹, 李 超²,
穆青翼^{2,3,4,5}, 宁奕冰^{2,3,4,5}, 徐盼盼^{3,4,6,7,8}, 彭建兵^{2,3,4,5}

1. 长安大学建筑工程学院, 陕西西安 710054
2. 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西西安 710054
3. 长安大学秦岭生态环境研究院, 陕西西安 710054
4. 长安大学陕西省黄河科学研究院, 陕西西安 710054
5. 黄土科学全国重点实验室, 陕西西安 710054
6. 长安大学水利与环境学院, 陕西西安 710054
7. 旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 陕西西安 710054
8. 水利部旱区生态水文与水安全重点实验室, 陕西西安 710054

摘要: 为了解秦岭北麓西安段人类活动对生态系统的影响, 采用人类足迹指数表征人类活动强度, 通过 InVEST 模型评价生态系统服务功能, 分析近 20 a 秦岭北麓西安段人类活动与生态系统服务时空演化规律, 凝练二者在海拔梯度上的空间关联特征. 结果表明: 近 20 a 研究区高和较高等级的人类活动强度区面积分别扩大了 5.99 倍和 1.85 倍. 人类活动强度提高的区域主要集中在周至县平原区、山前控制带和 4 条主要峪道, 城镇化、公路建设和旅游业发展是秦岭北麓人类活动强度增大的主要原因. 秦岭北麓生态系统的水源涵养、土壤保持和碳储量受到人类活动的影响程度逐渐减弱, 稳定性有所提升; 生境质量对人类活动变化表现的愈加敏感, 低山区人类活动强度的增大削弱了生境质量的稳定性. 秦岭北麓人地关系存在明显的海拔分异特征. 从人类活动-生态系统服务关联特征角度开展秦岭北麓人地协调分区时, 可根据海拔将秦岭北麓分为人地冲突强烈区 (<853 m); 人地协调失衡区 (853~1 105 m); 人地协调敏感区 (1 105~1 576 m) 和人地关系平衡区 (>1 576 m).

关键词: 工程地质; 秦岭北麓; 人类活动; 生态服务功能; 海拔; 人地协调分区.

中图分类号: P901

文章编号: 1000-2383(2026)02-432-14

收稿日期: 2024-12-23

Elevation Gradient Characteristics of the Interfeeding between Human Activities and Ecological Environment in Xi'an Section of the Northern Foot of Qinling Mountains

Wang Rui^{1,3,4}, Shen Yanjun^{2,3,4,5*}, Wang Lei¹, Li Chao², Li Shaojie¹, Mu
Qingyi^{2,3,4,5}, Ning Yibing^{2,3,4,5}, Xu Panpan^{3,4,6,7,8}, Peng Jianbing^{2,3,4,5}

1. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China

基金项目: 国家重点研发计划项目(No. 2024YFF1306502); 国家自然科学基金项目(No. 42341101); 长安大学中央高校优秀青年团队项目(No. 300102263401); 西安市秦岭北麓山水林田湖草沙一体化保护与修复工程子项目(No. 2203-610100-04-05-321562).

作者简介: 王瑞(1992-), 男, 副教授, 主要从事岩土工程与工程地质研究. ORCID: 0000-0002-7794-358X. E-mail: wangrui@chd.edu.cn

* **通讯作者:** 申艳军, ORCID: 0000-0001-8109-4819. E-mail: shenyj@chd.edu.cn

引用格式: 王瑞, 申艳军, 王磊, 李少杰, 李超, 穆青翼, 宁奕冰, 徐盼盼, 彭建兵, 2026. 秦岭北麓(西安段)人类活动与生态环境互馈的海拔梯度特征. 地球科学, 51(2): 432-445.

Citation: Wang Rui, Shen Yanjun, Wang Lei, Li Chao, Li Shaojie, Mu Qingyi, Ning Yibing, Xu Panpan, Peng Jianbing, 2026. Elevation Gradient Characteristics of the Interfeeding between Human Activities and Ecological Environment in Xi'an Section of the Northern Foot of Qinling Mountains. *Earth Science*, 51(2): 432-445.

2. School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China
3. Academy of Qinling Ecological Environment, Chang'an University, Xi'an 710054, China
4. Academy of Yellow River Sciences of ShaanXi Province, Chang'an University, Xi'an 710054, China
5. State Key Laboratory of Loess Science, Xi'an 710054, China
6. School of Water and Environment, Chang'an University, Xi'an 710054, China
7. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effect in Arid Region of the Ministry of Education, Xi'an 710054, China
8. Key Laboratory of Eco-Hydrology and Water Security in Arid and Semi-Arid Regions of Ministry of Water Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, China

Abstract: In order to elucidate the impact of human activities on ecosystem in Xi'an section of the northern foot of Qinling Mountains, the spatio-temporal evolution of human activities and ecosystem services in the region in the past 20 years was analyzed in the present study. The human footprint index is adopted to quantify intensity of human activities. The InVEST model is used to evaluate the ecosystem services. Their spatial correlation characteristics are analyzed from the perspective of altitude gradient. The results indicate that the area of high and relatively high level human activity intensity increased by 5.99 times and 1.85 times, respectively. The areas where the intensity of human activities increased were mainly concentrated in the plain area of Zhouzhi County, the control zone in front of mountains and the four main valley roads. Urbanization, highway construction and tourism development are the main reasons for the increase of human activities in the northern foot of Qinling Mountains. In the past 20 years, the water conservation, soil conservation and carbon storage service functions of the ecosystem in the northern foot of the Qinling Mountains have been gradually weakened by human activities. Their stability has improved. However, habitat quality has become more sensitive to changes in human activities. The increasing intensity of human activities in the low mountainous areas weakened the stability of habitat quality. The coordination areas between human activities and ecological environment in the northern foot of Qinling Mountains can be divided into four categories: intense conflict area of human-land relationship (<853 m), unbalance area of human-land coordination (853~1 105 m), sensitive area of human-land coordination (1 105~1 576 m), balance area of human-land relationship (>1 576 m).

Key words: engineering geology; northern foot of Qinling Mountains; human activities; ecological environment; ecosystem services; elevation; human-land coordination area.

0 引言

近20 a我国社会经济高速发展,人类活动对生态系统的影响加剧,生态问题日益突出(Li *et al.*, 2018, 2021). 生态系统为人类提供了多种服务,人类依赖自然生态系统服务功能维持社会发展,而生态环境的退化制约了人类社会的发展. 联合国千年生态系统评估指出,全球60%的生态系统服务功能正在或者已经退化,主要原因是人类活动的干扰(Reid *et al.*, 2005).

人类活动具有复杂性和不确定性,其与生态系统服务的相互作用机制仍在探索中(Xu *et al.*, 2019). 人类活动最直接的表现形式是土地利用的变化,通过直接或间接对生态系统格局与过程的影响,改变地表景观格局,导致地表生态过程发生剧烈变化,从而导致生态系统服务功能的增强或减弱(张彩霞等, 2008; 郭少壮等, 2018). 水坝、交通设施修建、矿产资源开发、过度放牧、农田开垦等高强度人类活动导致森林覆盖面积下降、草地退化、水土

流失等严重的生态退化现象,极大的改变了生态系统结构和功能,降低了生态系统服务供给,严重损害人类福祉(Darvill *et al.*, 2016; 柳冬青等, 2020). 为了厘清人类活动与生态系统间复杂的互馈机制,研究人员尝试从多种角度探讨人类活动强度与生态系统服务之间的关系(Sun *et al.*, 2022; Huang *et al.*, 2023). 武燕等(2023)运用双变量空间自相关和多尺度地理加权回归方法厘清了成渝城市群地区人类活动强度的“双核圈层式”空间特征,指出人类活动强度增强会导致生态系统服务价值减少,二者存在显著的空间负相关,退耕还林等措施对生态系统恢复至关重要. 郑碧军等(2022)等采用空间分析和地理探测器方法分析了汉中市人类活动对生态系统质量的影响,发现二者在汉中盆地呈现弱负相关,在秦巴山区呈现弱正相关的关系. Yang and Zhu (2024)采用InVEST模型和人类足迹指数法分析深圳市生态系统服务和人类活动强度空间关联特征,指出海拔对地地系统的关联关系影响显著. 人类活动分布和生态系统服务均与自然地理条件密切相

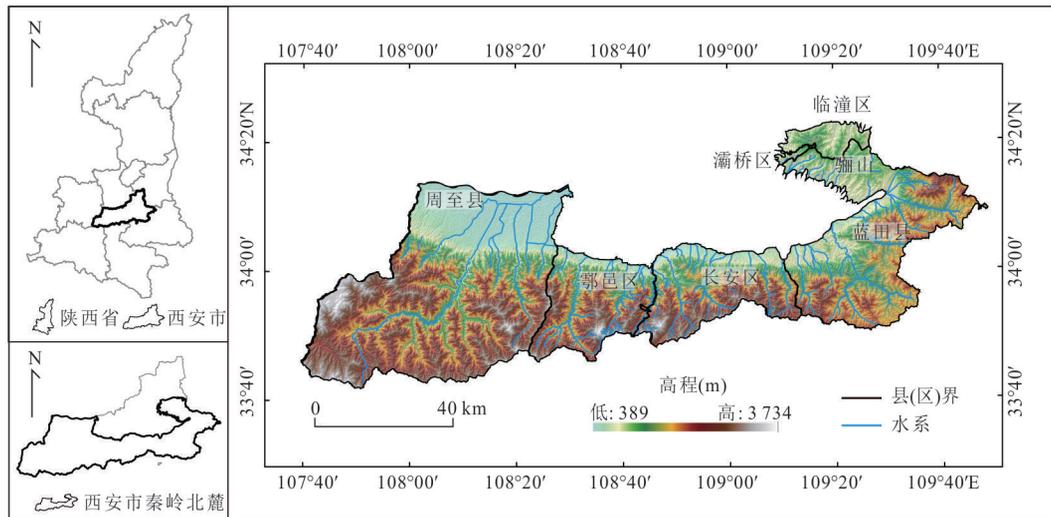


图1 研究区位置

Fig.1 Location of research area

关,在探索人地互馈关系时,引入自然条件往往可以获得更加客观的研究结论。

秦岭是我国重要的生态屏障和南北气候分界线,是黄河、长江两大流域的分界线,被誉为“中央水塔”。秦岭地区的生态价值对区域内森林、矿产、生物、水资源及人类生存意义重大,其生态环境及服务功能在近年来引起了广泛的关注和重视(彭建兵等,2023)。特殊的地理位置和深厚的文化底蕴奠定了秦岭地区人类活动广泛分布的基础,强烈的人类活动对秦岭生态环境的演进产生了深远影响,在特定的视角下剖析人地互馈作用的特征和机制有助于保护秦岭生态环境,提升其对人类社会的惠益(申艳军等,2024)。

本文以秦岭北麓西安段为研究区域,关注近20 a秦岭北麓人地互馈的基本特征,开展人类活动强度和生态系统服务的时空演化及相关分析,通过引入海拔这一区域自然地理条件,分析二者在海拔梯度上的空间关联特征,进而阐明人类活动变化规律及其对生态系统服务演化的影响机制,开展基于人类活动—生态系统服务相关性的秦岭北麓人地协调分区。研究成果可为秦岭北麓地区人地协调发展提供科学依据。

1 研究区域概况及数据来源

1.1 研究区概况

研究区域位于陕西省中部,西安市南部(图1),属于秦岭北麓主要部分,东西长约200 km,南北宽

约89 km,总面积6466.93 km²,占秦岭北麓总面积62.27%。该区域东邻渭南市临渭区、商洛市洛南县;西至宝鸡市眉县、太白县;南抵秦岭主脊,与汉中市佛坪县、商洛市柞水县分界;北接西安市区。研究区域处于暖温带半湿润大陆性季风气候区。

1.2 数据来源及处理

1.2.1 数据来源 本文所采用数据包括秦岭北麓(西安段)矢量边界数据、土地覆盖数据、人口密度数据、夜间灯光数据和道路网络等数据。其中,秦岭北麓矢量边界数据来自西安市山水办;土地覆盖数据来自国家冰川冻土沙漠科学数据中心,该数据使用Google地球引擎上的335709张Landsat图像,结合从中国土地利用/覆盖数据集(CLUD)中提取的稳定样本和来自卫星时间序列数据、谷歌地球和谷歌地图的视觉解释样本收集训练样本,空间分辨率30 m(Yang and Huang, 2021);人口密度数据采用美国国家橡树岭实验室(<https://landscan.ornl.gov/landscan-datasets>)开发的LandScan全球人口动态统计分析数据库,空间分辨率为30";夜间灯光数据来自NOAA网站NGDC数据中心(<https://www.ngdc.noaa.gov/eog/download.html>),其中,2000—2011年为DMSP/OLS影像,空间分辨率1000 m,2012—2022年为NPP/VIIRS影像,空间分辨率为500 m;路网数据来自OpenStreetMap(<https://www.openstreetmap.org/>);DEM数据来自美国太空总署(NASA)和国防部国家测绘局(NIMA)提供的SRTM1数据,精度为30 m;降水量、蒸散发数据来自国家青藏高原科学数据中心(Peng, 2020,

2022);土壤数据来自世界土壤数据库(HWSD)(FAO and IIASA, 2023).

1.2.2 数据处理 由于DMSP/OLS和NPP/VIIRS两种夜间灯光数据存在较大的差异,为了使二者在时间上具有连续可比性,本文参考Li *et al.* (2018)和Liu *et al.* (2022)的研究,将NPP/VIIRS数据重采样到1 000 m空间分辨率,并利用DMSP/OLS和NPP/VIIRS数据共有年份,以NPP-VIIRS的DN值为自变量,DMSP/OLS的DN值为因变量,借助幂函数模型进行建模,以此对两种夜间灯光数据进行统一,公式如下:

$$OLS = a \cdot VIIRS^b, \quad (1)$$

本文所采用的土地覆盖数据为9种地类,秦岭北麓区域包含耕地、林地、灌木、草地、水体、荒地和不透水面,共7种地类.

本文以OSM路网数据为基础,参考谷歌历史影像、常用地图软件等,对OSM道路中缺失、标注错误等数据进行绘制及修改,并将路网数据按照高速、省道、国道、县乡道、其他道路及铁路6类进行重分类.将所有数据统一转换为WGS 1984 UTM投影坐标系.

2 研究方法

2.1 人类足迹指数构建方法

人类足迹指数(Human footprint index, HFI)是Sanderson *et al.* (2002)提出的人类活动强度空间数据化方法,本文参考相关文献(段群滔和罗立辉, 2020)选用土地利用、人口密度、夜间灯光、道路网络4类数据构建人类足迹指数(图2).

2.1.1 土地利用 秦岭北麓林地覆盖率高,本文参

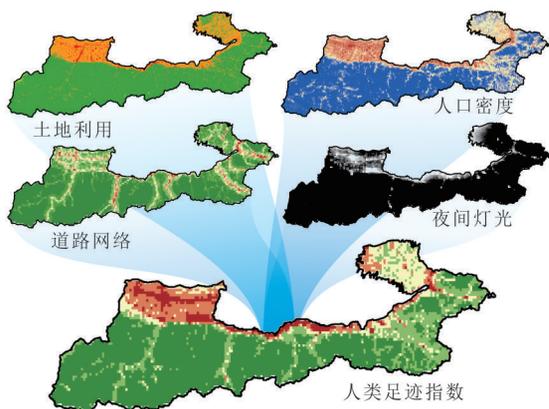


图2 人类足迹指数指标体系示意

Fig.2 Human footprint index system

考同为高林地覆盖率的东北虎豹国家森林公园土地利用分类对7种地类进行赋值(张晓宇等, 2022).不透水面为建筑用地,受人类影响最大,赋值为10;耕地赋值为8;草地赋值为2;林地、灌木、水体及荒地赋值为0.

2.1.2 人口密度 人口密度反映了人类活动与生态系统之间相互作用强度(Ellis and Ramankutty, 2008),将秦岭北麓人口密度按对数方程进行赋值计算,值域为[0, 10].经计算得出对数公式如下:

$$pop_{score} = 2.183455 \times \log(pop_{density} + 1), \quad (2)$$

式中: pop_{score} 表示该栅格数据重新赋值分数; $pop_{density}$ 表示各栅格像元人口密度.

2.1.3 夜间灯光 参考以往研究(段群滔和罗立辉, 2020),以2020年灯光数据为基准,将2020年数据中DN值等于0的栅格赋值为0分,再将DN值大于0的栅格,利用分位数方法等分为10份,从小到大依次赋值为1~10分.其余各年份的数据依照2020年的十分位数将DN值大于0的栅格赋值为1~10分, DN值等于0的赋值为0分.

2.1.4 交通可达性 将秦岭北麓道路等级分为5类,根据两侧距离进行重分类赋值并进行等权叠加,采用Min-Max标准化法将叠加后的栅格结果进行标准化处理,使其分数范围与其他人类足迹指标统一,具体公式为(Woolmer *et al.*, 2008):

$$dl_{score} = \frac{dl_{density} - dl_{min-density}}{dl_{max-density} - dl_{min-density}} \times 10, \quad (3)$$

式中: dl_{score} 表示叠加后栅格数据经过标准化处理的分数; $dl_{density}$ 表示叠加后的栅格数据值; $dl_{max-density}$ 表示叠加后栅格数据中的最大值; $dl_{min-density}$ 表示叠加后栅格数据中的最小值.

2.2 秦岭北麓(西安段)生态服务功能评价方法

2.2.1 水源涵养功能 InVEST模型是用于评价生态系统服务功能及其产生的经济价值的常用方法(Sharp *et al.*, 2018).生态系统产水量通过其中的Water Yield Module计算得到,其基于广泛使用的经验模型Budyko水热平衡方程,依据降水、土壤最大根茎深度、土地利用、潜在蒸散发和植物可利用含水量等参数计算.产水量减去土壤水分饱和后流失的径流量的剩余部分(地表径流量)即为生态系统水源涵养量,由此可确定项目区水源涵养服务的空间分布情况,根据规范(HJ 1173-2021, 2021),计算公式如下:

$$Q = \sum_{i=1}^n A_i \times (P_i - R_i - ET_i) \times 10^{-3}, \quad (4)$$

$$R_i = P_i \times \alpha, \quad (5)$$

式中: Q 为水源涵养量, 单位为 m^3/a ; A_i 为第 i 类生态系统的面积, 单位为 m^2 ; P_i 为第 i 类生态系统的产流降雨量, 单位为 mm/a ; R_i 为第 i 类生态系统的地表径流量, 单位为 mm/a ; ET_i 为第 i 类生态系统的蒸散发量, 单位为 mm/a ; α 为平均地表径流系数, 取值为耕地 0.500 0、林地 0.013 3、灌木 0.041 7、草地 0.082 0、水体 0、荒地 1.000 0、建筑用地 1.000 0; i 为项目区内第 i 类生态系统类型, $i=1, 2, 3, \dots, n$.

2.2.2 水土保持功能 基于 InVEST 模型中的 Sediment Delivery Ratio model 计算生态系统土壤保持量. 以潜在侵蚀与实际侵蚀的差表示地表植被对水土流失量的降低, 用来沙量与泥沙滞留效率的乘积来计算地表植被拦截上游冲积的泥沙的作用和能力, 两者相加即为生态系统土壤保持量(陈姗姗, 2016), 具体公式为:

$$\text{SEDRET}_i = \text{RKLS}_i - \text{USLE}_i + \text{SDER}_i, \quad (6)$$

$$\text{RKLS}_i = R_i \times K_i \times \text{LS}_i, \quad (7)$$

$$\text{USLE}_i = R_i \times K_i \times \text{LS}_i \times C_i \times P_i, \quad (8)$$

$$\text{SDER}_i = \text{SE}_x \sum_{y=1}^{x-1} \text{USLE}_y \prod_{z=y+1}^{x-1} (1 - \text{SE}_z), \quad (9)$$

$$R_i = 0.0534 \times \text{Rain}_i^{1.6548}, \quad (10)$$

式中: SEDRET_i 是项目区内任意栅格 i 的土壤保持量, 单位为 t ; RKLS_i 和 USLE_i 分别为栅格 i 上的潜在侵蚀量和实际侵蚀量, 单位为 t ; SDER_i 为泥沙持留量, 单位为 t ; SE_x 为泥沙持留率, USLE_y 为上坡栅格 y 产生泥沙量, SE_z 为上坡栅格的泥沙持留量; R_i 为栅格上的降雨侵蚀力因子, 根据经验公式计算, 单位为 $\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$; K_i 为栅格上的土壤可侵蚀因子, 土壤可侵蚀值越高越容易受到外力侵蚀; LS_i 是栅格上的地形因子, 从地形环境反映土壤侵蚀潜力; C_i 是栅格上的植被覆盖管理因子, 反映植被覆盖对土壤侵蚀的缓解程度; P_i 是栅格上的水土保持因子, 反映人为干预对水土保持的缓解程度; Rain_i 为年平均降水量.

2.2.3 生境质量功能 生境包括生态系统本底具有的资源和条件, 能为有机体提供栖息、生存和繁殖的空间载体. 秦岭北麓人类活动强烈, InVEST 模型中 Habitat Quality 模块可以评估人为威胁下的生境质量. 以像元数据作为评价单元, 以土地利用类型数据作为基础, 利用生境适宜性、威胁源的接近度和强度、生境对威胁因子的敏感度, 以及胁迫作用在一定距离内退化和衰减的速度等影响因素进

行生境质量评估(Terrado *et al.*, 2016), 通过在生境质量评价模块输入相关参数生成生境质量空间分布图. 计算公式如下:

$$Q_{sj} = H_j \left[1 - \left(\frac{D_{sj}^z}{D_{sj}^z + k^z} \right) \right], \quad (11)$$

$$D_{sj} = \sum_{r=1}^R \sum_{y=1}^{Y_r} \left(\frac{\omega_r}{\sum_{r=1}^R \omega_r} \right) r_y i_{rxy} \beta_x S_{jr}, \quad (12)$$

$$i_{rxy} = 1 - \left(\frac{d_{xy}}{d_{r\max}} \right) \text{(线性衰减)}, \quad (13a)$$

$$i_{rxy} = \exp \left[- \left(\frac{2.99}{d_{r\max}} \right) d_{xy} \right] \text{(指数衰减)}, \quad (13b)$$

式中: Q_{sj} 表示土地利用类型为 j 的栅格 x 的生境质量; H_j 表示土地利用类型 j 的生境适宜性; D_{sj} 表示土地利用类型或生境类型为 j 的栅格 x 的生境退化程度; z 表示模型的默认设置参数, 一般为 2.5; k 表示半饱和常数, 一般设置为 0.5; R 表示胁迫因子的总数量; Y_r 表示胁迫因子 r 的栅格总数量; ω_r 表示胁迫因子 r 对生境威胁的标准化权重, 取值范围为 0~1, 值越大威胁越大; r_y 表示栅格 y 中胁迫因子 r 的影响; β_x 表示栅格 x 受法律、社会等保护的程 度, 取值范围为 0~1; S_{jr} 表示土地利用类型或生境类型 j 对胁迫因子 r 的敏感性, 取值范围为 0~1, 值越大越敏

表 1 威胁因素系数

Table 1 Threat factors coefficient

| 威胁因素 | 最长威胁距离 $d_{r\max}$ (km) | 权重 ω_r | 距离函数衰减 类型 |
|------|----------------------------|---------------|--------------|
| 耕地 | 4 | 0.7 | 指数衰减 |
| 建筑用地 | 8 | 1.0 | 指数衰减 |
| 公路 | 6 | 1.0 | 线性衰减 |
| 铁路 | 2 | 0.8 | 线性衰减 |

表 2 土地利用类型对生境威胁因子的敏感性 (S_{jr})

Table 2 Sensitivity of land use types to habitat threat factors (S_{jr})

| 土地利用 | 生境适宜度 | 耕地 | 建设用地 | 公路 | 铁路 |
|------|-------|------|------|------|------|
| 耕地 | 0.4 | 0.25 | 0.40 | 0.40 | 0.30 |
| 林地 | 1.0 | 0.70 | 0.80 | 0.80 | 0.75 |
| 灌木 | 1.0 | 0.70 | 0.80 | 0.80 | 0.75 |
| 草地 | 1.0 | 0.70 | 0.75 | 0.80 | 0.75 |
| 水体 | 0.8 | 0.65 | 0.70 | 0.65 | 0.60 |
| 建筑用地 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 荒地 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

表3 各地类碳库数据表(单位:t/ha)
Table 3 Carbon pool data for each land use(Unit: t/ha)

| 土地利用 | C_{above} | C_{below} | C_{soil} | C_{dead} |
|------|-------------|-------------|------------|------------|
| 耕地 | 46.50 | 80.50 | 107.30 | 13.00 |
| 林地 | 58.30 | 115.20 | 268.00 | 13.00 |
| 灌木 | 39.45 | 82.83 | 163.13 | 7.61 |
| 草地 | 20.59 | 50.46 | 58.28 | 2.22 |
| 水体 | 0 | 70.00 | 0 | 0 |
| 建筑用地 | 3.50 | 5.45 | 10.57 | 0 |
| 荒地 | 9.20 | 0.10 | 12.50 | 0 |

感; i_{rxy} 表示胁迫因子 r 所在栅格 y 与生境所在的栅格 x 之间的线性或指数衰减距离函数; d_{xy} 表示栅格 x 与栅格 y 之间的线性距离; d_{rmax} 表示胁迫因子 r 在空间上对生境产生影响的最大距离。

根据项目研究区域土地利用类型和以往研究(Sharp *et al.*, 2018),威胁因素及其敏感性见表1,2。**2.2.4 碳汇功能** InVEST模型中碳储量模块根据土地利用类型中的4个碳池(地上生物量,地下生物量,土壤和死亡有机物)的储量来估计当前储存在研究区域中的碳量或随时间推移而隔离的碳量(张卓,2022)。根据秦岭北麓土地利用类型划分出4个对应碳库,用其覆盖面积分别乘以相应平均值碳密度,求和后即得到总碳储量。计算如下:

$$C_{total} = C_{above} + C_{below} + C_{soil} + C_{dead}, \quad (14)$$

式中: C_{above} 代表地上生物质碳储量,包括土壤上方所有活植物物质(如树枝、树叶、树干等); C_{below} 代表地下生物质碳储量,如活植物根系; C_{soil} 代表土壤有机质碳储量,包括土壤的有机成分,是最大的陆地碳库; C_{dead} 代表死亡有机质碳储量,如垃圾、枯木等; C_{total} 代表总碳储量。碳库数据参考陕西秦岭(渭河流域)数据(王晓晨,2022),该碳库缺少灌木数据,考虑到在研究区域和研究时间内,灌木面积占比较小,本文将灌木碳库数据取林地与草地的平均值。各地类碳库数据如表3所示:

3 结果

3.1 人类足迹指数时空演化规律

利用自然间断点分级法(Jenks)将人类足迹指数分为低、较低、中等、较高、高5个等级,得到秦岭北麓人类足迹指数空间分布如图3所示。从空间角度分析,高人类足迹指数区域占比较少,主要集中在周至县城及周边乡镇、长安区山前公路沿线的各个村落集中区和蓝田县九间房镇等区域,用地类

型表现为建筑用地为主。较高人类足迹区域主要分布在村落之间的过渡区,用地类型以农田为主。中等人类足迹区域主要分布在骊山浅丘及各个峪道,用地类型以道路控制为主。

通过图4所示近20a秦岭北麓人类足迹指数转移情况可以看出,近20a来研究区中等、较高和高等级的人类活动强度面积总和占比始终较为稳定,保持在25%左右(后文称人类扰动区)。随着时间推移,高和较高等级的人类活动强度区面积逐渐增加,从2000年的0.85%和5.04%增加至2020年的5.09%和9.34%,分别扩大了5.99倍和1.85倍。较低和低人类足迹区域面积占比超过70%,用地类型以林地、灌木和草地为主。近20a来,秦岭北麓人类活动的转移主要在人类扰动区内部和非人类扰动区内部进行,两类区域之间的转移主要发生在蓝田、骊山浅丘和周至浅山区。

人类足迹指数及其变化随高程分布如图5所示。图5中气泡圆心位置表示2000年的人类足迹指数沿高程分布情况,气泡大小表示2020年相对于2000年的变化量。可以根据近20a人类足迹指数的分布和变化划分为4类区域,即低海拔高人类足迹指数提高区(L-H-I)、中海拔较高人类足迹指数降低区(M-M-D)、中海拔低人类足迹指数提高区(M-L-I)和高海拔低人类足迹指数稳定区(H-L-S)。L-H-I型区域主要分布在海拔400~900m的范围内,M-M-D型区域主要分布在海拔>600m的范围内,H-L-S型区域主要分布在海拔>1500m的范围内,M-L-I型区域主要分布在海拔600~1500m的范围内。

通过图6所示近20a秦岭北麓人类活动变化分布可以看出,L-H-I区集中在周至县平原区及山前控制带区域,M-L-I集中在北麓的4条峪道,其中涝峪、辋峪和道沟峪近20a的高速公路建设促使峪道人类活动强度的显著提升,石砭峪直通石砭峪水

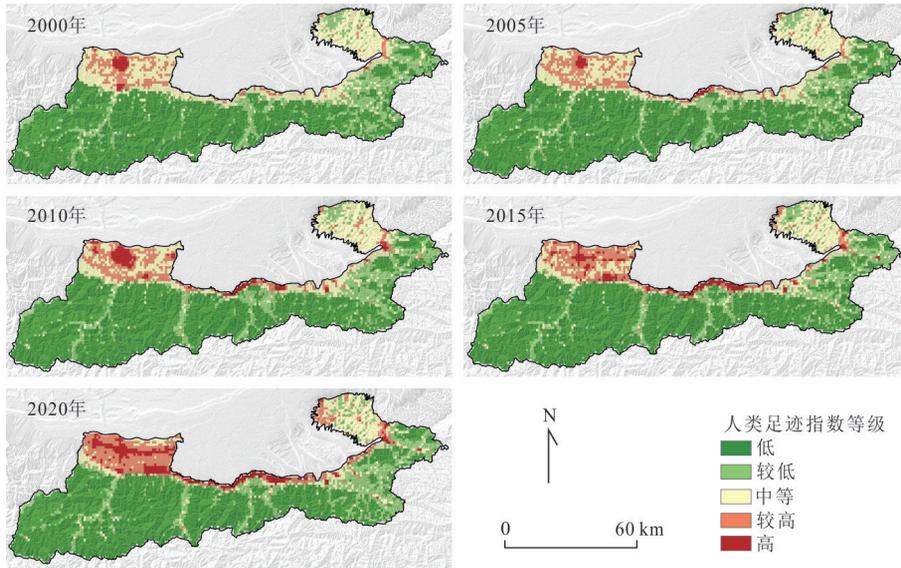


图 3 2000—2020 年秦岭北麓人类足迹指数空间分布

Fig.3 Spatial distribution of human footprint index in the northern foot of Qinling Mountains from 2000 to 2020

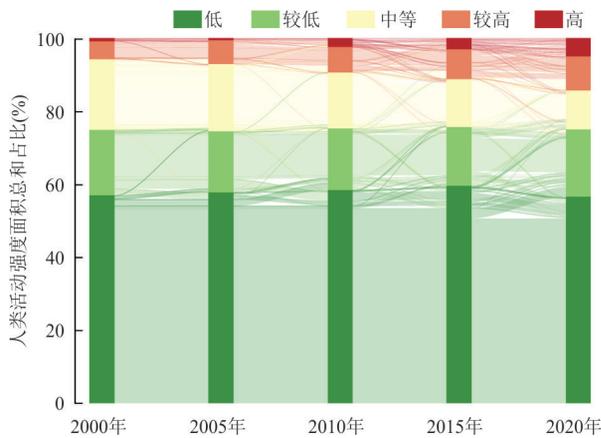


图 4 近 20 a 秦岭北麓人类足迹指数转移情况

Fig.4 Human footprint index transfer in the northern foothills of Qinling Mountains in recent 20 years

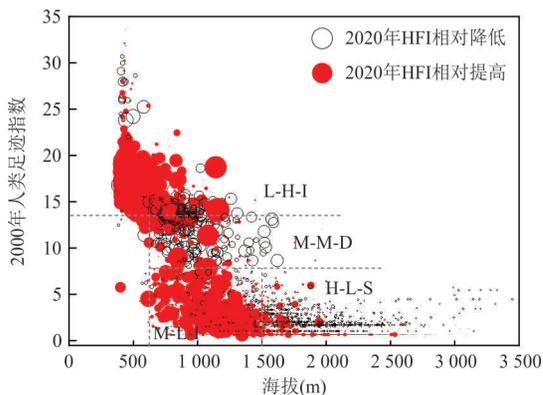


图 5 近 20 a 人类足迹指数及其变化随高程分布

Fig.5 Human footprint index and its variation with elevation in recent 20 years

库、牛背梁国家自然保护区等,旅游业较为发达.城镇化、公路建设和旅游业发展是主导秦岭北麓人类活动强度增大的主要原因.同时可以看出,M-M-D区域主要集中于周至浅山区并且在蓝田和骊山浅丘区域零星分布,大范围的退耕还林是主导人类活动强度降低的主要原因.

3.2 生态系统服务功能评价

3.2.1 生态服务功能空间分布特征 借助自然间断点分级法确定 2020 年秦岭北麓的水源涵养量、土壤保持、生境质量和碳储量 4 种生态系统服务(Ecosystem services, ESs)空间分布如图 7 所示.研究区四种生态系统服务功能均呈现明显的空间分异特征.水源涵养、生境质量和碳储量均呈现出南高北低、西高东低的整体分布特征.低点主要集中在周至县及山前控制带,此处人类活动强度大,农业活动频繁,建筑用地密集.高点主要集中在中高山地区,此处植被覆盖率高,生境质量好,具备良好的水源涵养和固碳能力.峪道内人类活动相对强烈,水源涵养和生境质量相比中高山地区有所降低.骊山浅丘区生境破碎,水源涵养和碳储量均较差.相比其他 3 类生态系统服务功能,秦岭北麓的土壤保持存在中高山区略低于浅山区的特殊空间分布规律,其原因可能是随着海拔升高,降雨量和坡度逐渐增大且植被由乔木过渡至灌草,众多不利因子共同作用导致高海拔区土壤保持能力降低.

3.2.2 生态系统服务功能随海拔分梯度变化特征 秦岭北麓(西安段)地貌种类多,海拔落差大,气候

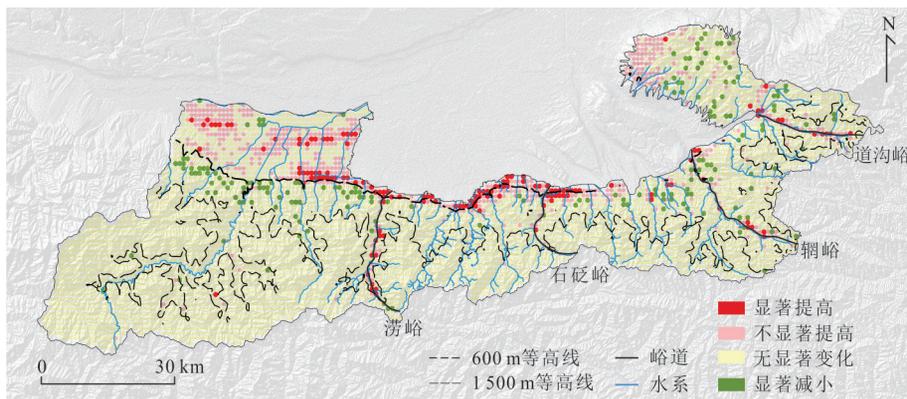


图 6 2000—2020 年秦岭北麓人类活动变化

Fig.6 Change of human activities in the northern foot of Qinling Mountains from 2000 to 2020

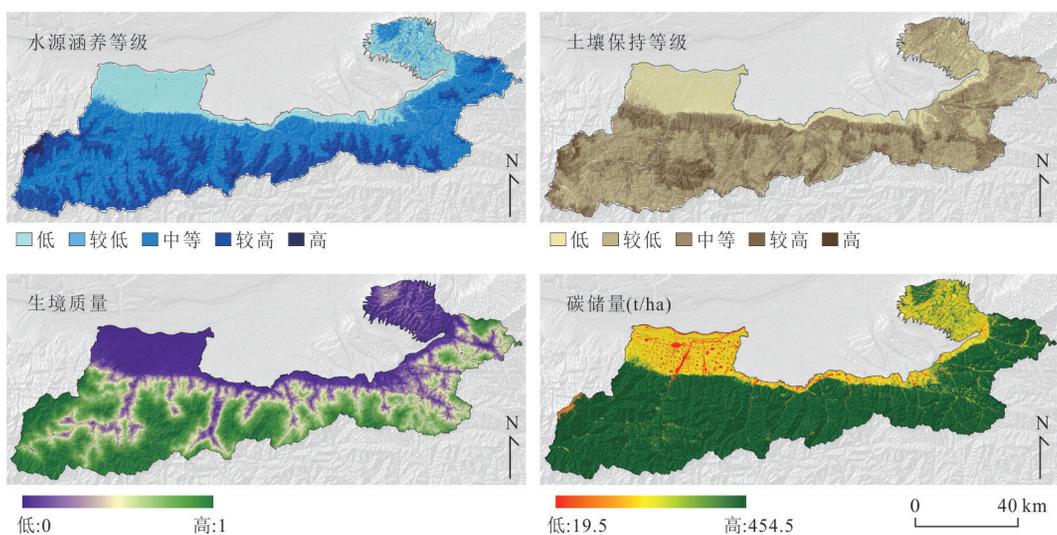


图 7 秦岭北麓 2020 年生态系统服务空间分布

Fig.7 Spatial distribution of ecosystem services in the northern foot of Qinling Mountains in 2020

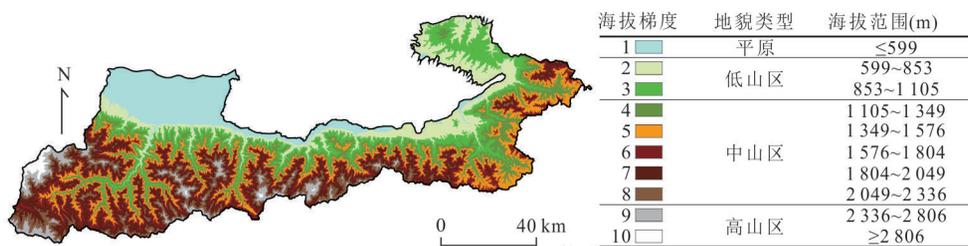


图 8 海拔梯度带分级

Fig.8 Altitude gradient zone classification

垂直分带明显. 通过图 7 可以看出, 海拔对秦岭北麓的生态系统服务功能存在明显的控制作用, 对不同海拔范围内的生态系统服务功能开展梯度分析有助于进一步厘清秦岭北麓生态系统服务功能的时空分异特征. 通过自然间断点分级法将海拔分为图 8 所示 10 个梯度带.

近 20 a 生态系统服务功能沿海拔梯度的变化规律如图 9 所示. 可以看出, 水源涵养量和生境质量均随着海拔增加逐渐增加, 与海拔呈现正相关关系. 随着海拔的升高, 土壤保持呈现先迅速增加后缓慢减小再缓慢增加的趋势, 在海拔 853~1 349 的中低山范围内土壤保持能力最好. 随着海拔的升

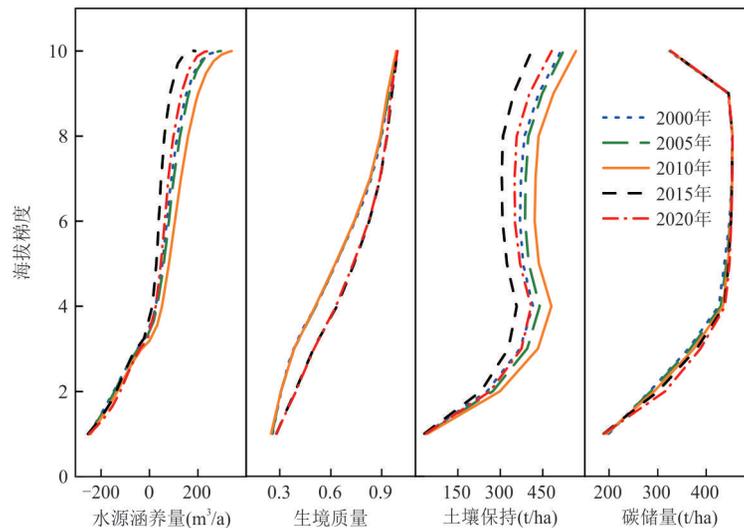


图9 近20 a生态系统服务功能沿海拔梯度的变化规律

Fig.9 Changes of ecosystem service function along elevation gradient in recent 20 years

高,碳储量呈现出先迅速增加,后保持平稳,再迅速减小的趋势,在1 105~2 336的中山区保持平稳,在高山区迅速降低,植被的垂直分带是碳储量海拔分异的主要控制因素之一。

对比4种服务功能随时间推移的变化特征可以看出,生境质量和碳储量在599~1 576 m的中低山区变化最为显著,且随着时间推移其服务功能有所提升。由于中低山区人类活动较为强烈,结合图6所示近20 a人类活动强度可以看出,除个别峪道外,600~1 500 m范围内的人类活动强度呈现出显著降低的趋势,可以认为人类活动强度的降低对生境质量和碳储量的提升起到了促进作用。自1999年秦岭实施退耕还林还草工程以来,周至和蓝田浅山区林地面积显著增加,耕地向草地、林地的转化可以显著增加碳储量,提升生境质量(汲玉河等,2021; Si *et al.*, 2024)。

人类活动主要通过土地利用变化影响区域生态环境,气候变化一般通过温度和降水影响植被进而影响区域生态(Ren *et al.*, 2022)。水源涵养和土壤保持在1 349 m以上的中高山区变化更为显著,考虑到此范围内人类活动强度很低,气候变化可能是导致二者随时间波动的主要原因。从图9中可以看出,2015年秦岭北麓中高山区水源涵养和土壤保持能力最低,同时期降雨量秦岭北麓山区降水大幅减少,由此导致产水量与降雨侵蚀因子降低。以往研究也表明,高海拔区域陆地植被生态系统更易受到气候变化的影响(崔晓临等,2013)。

3.3 北麓(西安段)人类活动与生态系统服务关联性

从图6和图7可以看出,秦岭北麓的人类活动强度和生态系统服务之间在空间上存在较为显著的关联关系,总结人类活动和生态系统服务的时空关联规律有助于揭示人类活动与生态系统之间的互馈特征,为生态系统的保护和服务功能的提升提供宝贵参考。基于上述考虑,本节采用双变量局部空间自相关分析方法表征人类活动强度与生态系统服务之间的时空关联特征。

人类活动—生态系统服务关联性的空间聚集特征和人类活动强度与生态系统服务功能的空间关联特征如图10和图11所示。对比可以看出,人类活动与水源涵养、生境质量和固碳量3种生态系统服务功能之间呈现相似的空间聚集特征,考虑到H-H型和L-L型关联特征占比很少,在图11的海拔梯度分析中不加体现。在海拔1 105 m以下的平原—低山区以高人类活动强度—低生态系统服务型(H-L)关联特征为主;在海拔1 105 m以上的中高山区以低人类活动强度—高生态系统服务型(L-H)关联特征为主。海拔1 105 m可以作为人类活动与3种生态系统服务功能空间关联特征的分界线。

从图11中可以看出,人类活动与生态系统服务功能没有明显关联区域的高值区分布在海拔853~1 576 m的中低山区,人类活动强度和生态系统服务在此区域的变异性均较为强烈,人地互馈在此区域更为剧烈。以退耕还林还草、天然林养护、生态移民等工程为代表的秦岭森林生态修复活动也大多集中在此区域。可以认为,海拔853~1 576 m范围的

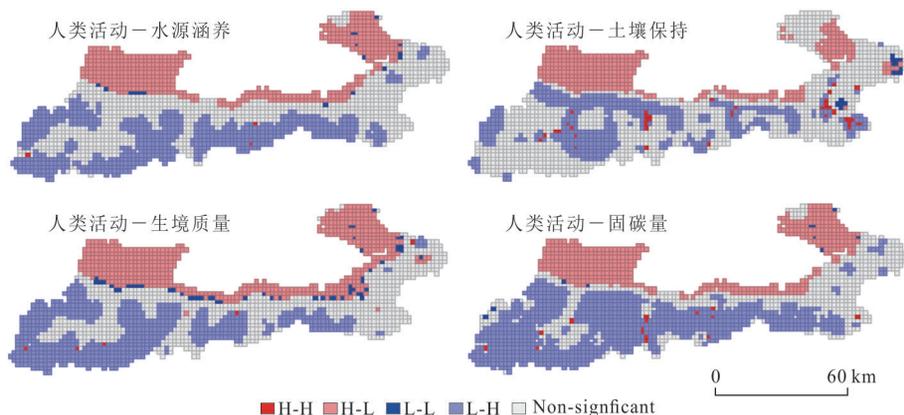


图 10 秦岭北麓 2020 年人类活动强度-生态系统服务功能空间关联特征

Fig.10 Spatial correlation between human activity intensity and ecosystem service function in the northern foot of Qinling Mountains in 2020

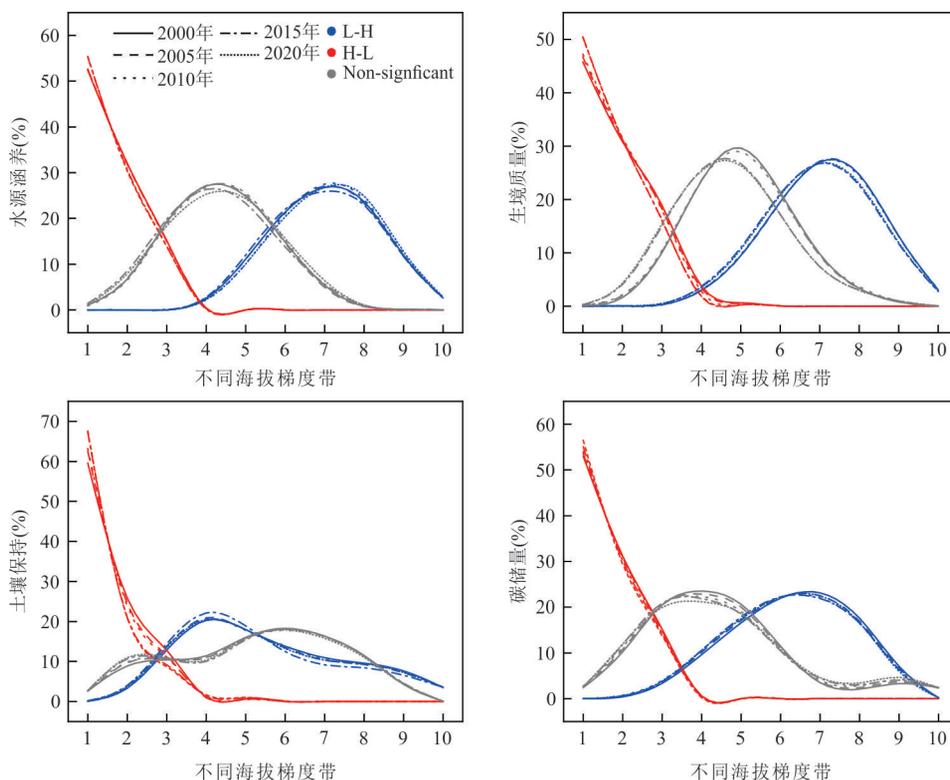


图 11 不同海拔梯度带上 HFI-ESs 空间聚集特征

Fig.11 Spatial aggregation characteristics of HFI-ESs in different altitude gradient belts

中低山区是秦岭北麓人地互馈的敏感区,人类活动在此区域的变化对生态系统的稳定性影响更为显著.如前所述,考虑到土壤保持功能受到降雨、植被和坡度的共同影响,其服务功能与另外三种服务功能的空间分布存在差异,其关联特征不做赘述.

进一步提取人类活动与生态系统服务二者的双变量 Moran's I 指数随时间变化规律如图 12 所示.可以看出,人类活动与生态系统服务之间呈现

明确的负相关关系.在近 20 a 里,人类活动与水源涵养、土壤保持和碳储量的负相关性呈现逐渐减弱的趋势,表明生态系统的上述服务功能受到人类活动的影响程度逐渐减弱,即生态系统的稳定性有所提升.

值得注意的是,近 20 a 里人类活动与生境质量之间的负相关性有所增大,表明生境质量对人类活动变化表现的更加敏感.生境质量的时序变化受到

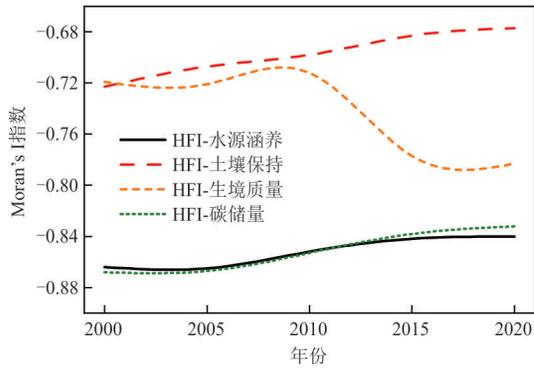


图 12 HFI-ESs Moran's I 指数

Fig.12 HFI-ESs Moran's I index

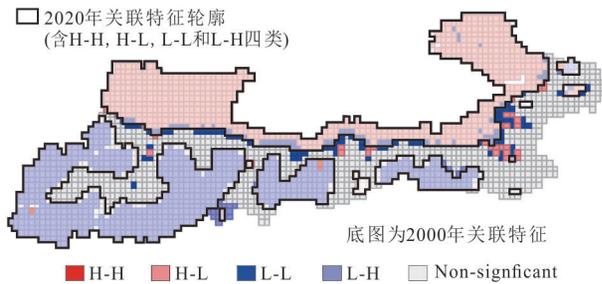


图 13 2000—2020 年人类活动与生境质量关联特征空间变异规律

Fig.13 Spatial variation of correlation characteristics between human activities and habitat quality from 2000 to 2020

自然和人为因素共同影响。InVEST 模型通过土地利用变化对生物多样性的威胁程度来体现生境质量,人为因素导致的土地利用变化是威胁生境质量的主要因素(Ma *et al.*, 2023)。为了识别出现上述规律的原因,提取 2000—2020 年人类活动与生境质量关联特征空间变异规律如图 13 所示。对比可以看出,20 年来秦岭北麓人类活动与生境质量关联特征的变化体现为 H-L 型和 L-L 型关联区域的减少,二者分别有助于降低和提升人类活动与生境质量的负相关性。H-L 型关联区域减少了 27 km²,L-L 型关联区域则减少了 68 km²,二者差异导致了人类活动与生境质量之间的负相关性增大。对比图 6 可以看出,蓝田区域的退耕还林还草工程降低了人类活动强度,有助于提升生境质量的稳定性(武文琦等, 2023);海拔 853~1 105 m 的低山区人类活动强度的增大则削弱了生境质量的稳定性。人类的基础设施建设、不合理的分区管理以及旅游活动的扩张可能是导致秦岭北麓低山区生境质量降低的主要驱动力(Zhang *et al.*, 2021)。

4 秦岭北麓(西安段)人地协调分区

近 20 a 秦岭北麓(西安段)人类活动强度增大的区域可以分为两类,一类为低海拔高人类足迹指数提高区(集中在周至县平原区和山前控制带,海拔 400~900 m),城镇化和旅游业的发展是该区域人类活动强度提升的主要原因;另一类为中海拔低人类足迹指数提高区(集中在涝峪、石砭峪、辋峪和道沟峪,海拔 600~1 500 m),高速公路建设促使涝峪、辋峪和道沟峪人类活动强度显著提升,石砭峪内直通石砭峪水库、牛背梁自然保护区等,旅游业较为发达。由此可见,城镇化、公路建设和旅游业发展是主导秦岭北麓人类活动强度增大的主要原因。从人地协调的角度考虑,周至县平原区和山前控制带区域人类活动强烈,人地冲突显著,涝峪、石砭峪、辋峪和道沟峪近年来人类活动显著提升,人地协调关系有劣化趋势。

结合图 11 和图 13 所示人类活动与生态环境质量的关联特征空间变异规律,发现海拔低于 1 105 m 的区域以高人类活动强度—低生态系统服务型关联特征为主;高于 1 105 m 的中高山区以低人类活动强度—高生态系统服务型关联特征为主,可见海拔 1 105 m 可以作为区分秦岭北麓人地互馈特征的重要参考阈值。此外,人类活动与生态系统服务功能没有明显关联区域的高值区分布在海拔 853~1 576 m 的中低山区,表明该范围内人地协调关系在空间上的关联不太稳定,变异性较为强烈,人类活动在此区域的变化对生态系统的稳定性影响相对更为显著。因此,可以认为海拔 853~1 576 m 范围的中低山区是秦岭北麓人地互馈的敏感区。图 6 和图 13 也表明海拔 853~1 105 m 的低山区人类活动强度的增大削弱了生境质量的稳定性。

由此可见,秦岭北麓人类活动强度的变化及其与生态系统服务之间的关联关系存在明显的海拔分异特征,依据海拔开展秦岭北麓人地协调分区可以较为全面的体现区域内的人地关系。鉴于此,根据人地互馈的区域特征和海拔分布规律,将秦岭北麓分为人地冲突强烈区(<853 m)、人地协调失衡区(853~1 105 m)、人地协调敏感区(1 105~1 576 m)和人地关系平衡区(>1 576 m),如图 14 所示。通过前文分析可知,近 20 a 秦岭北麓人类活动变化较为剧烈的区域分布在周至平原区、山前控制带、蓝田县、骊山浅丘区域和峪道内部,上述区域均与

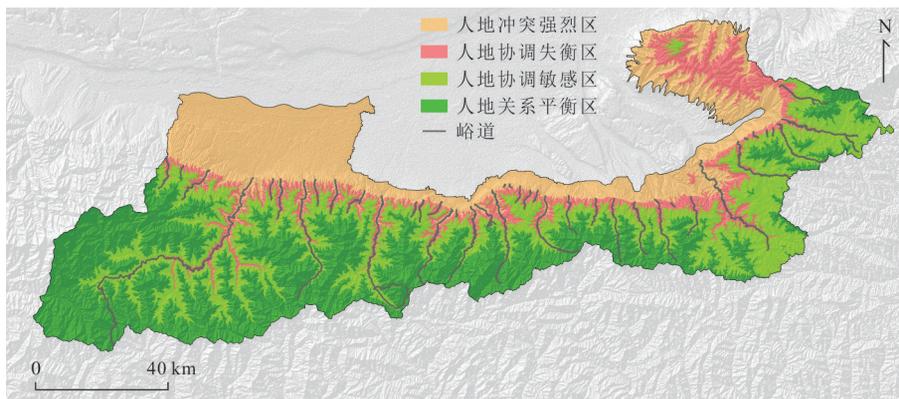


图14 基于人类活动—生态系统服务相关性的秦岭北麓(西安段)人地协调分区

Fig.14 Human-land coordination area in northern Qinling Mountains based on the correlation between human activities and ecosystem services

本文确定的人地协调分区相吻合。

人地协调失衡区和敏感区是从人类活动影响视角开展秦岭生态环境保护工作时值得重点关注的区域。对比图14中峪道分布可以看出,秦岭北麓的人地协调失衡区和敏感区与峪道分布呈现明确的对应关系,可见秦岭北麓人地协调关系呈现出明显的峪道控制特征,立足峪道开展秦岭北麓生态环境的保护和服务功能的提升工作有望取得显著成效。

5 结论

本文开展了秦岭北麓西安段近20 a的人类活动与生态系统服务时空演化及相关分析,凝练了二者在海拔梯度上的空间关联特征,尝试进行了秦岭北麓西安段人地协调分区,得到主要结论如下:

(1)近20 a研究区高和较高等级的人类活动强度区面积占比从0.85%和5.04%增加至5.09%和9.34%,分别扩大了5.99倍和1.85倍。人类活动强度增加的区域主要集中在周至县平原区、山前控制带和4条主要峪道,城镇化、公路建设和旅游业发展是秦岭北麓人类活动强度增大的主要原因。

(2)人类活动强度降低的区域集中于周至浅山区并且在蓝田和骊山浅丘区域零星分布,退耕还林是人类活动强度降低的主要原因。中低山区人类活动强度的降低对生境质量和碳储量的提升起到了促进作用;气候变化是导致水源涵养和土壤保持服务在中高山区显著变化的主要原因。

(3)近20 a秦岭北麓生态系统的水源涵养、土壤保持和碳储量服务功能受到人类活动的影响程

度逐渐减弱,稳定性有所提升;生境质量对人类活动变化表现的愈加敏感,低山区人类活动强度的增大削弱了生境质量的稳定性。

(4)从人类活动—生态系统服务关联特征角度开展秦岭北麓西安段人地协调分区时,可根据海拔将其分为人地冲突强烈区($<853\text{ m}$);人地协调失衡区($853\sim 1\ 105\text{ m}$);人地协调敏感区($1\ 105\sim 1\ 576\text{ m}$)和人地关系平衡区($>1\ 576\text{ m}$)。秦岭北麓人地协调关系呈现出明显的峪道控制特征。

References

- Chen, S.S., Liu, K., Li, T., et al., 2016. Evaluation of Ecological Service Function of Soil Conservation in Shangluo City Based on InVEST Model. *Acta Pedologica Sinica*, 53(3):800—807(in Chinese with English abstract).
- Cui, X.L., Bai, H.Y., Wang, T., 2013. Difference in NDVI with Altitudinal Gradient and Temperature in Qinling Area. *Resources Science*, 35(3):618—626(in Chinese with English abstract).
- Darvill, R., Lindo, Z., 2016. The Inclusion of Stakeholders and Cultural Ecosystem Services in Land Management Trade-off Decisions Using an Ecosystem Services Approach. *Landscape Ecology*, 31: 533—545. <https://doi.org/10.1007/s10980-015-0260-y>
- Duan, Q.T., Luo, L.H., 2020. A Dataset of Human Footprint Over the Qinghai-Tibet Plateau During 1990—2015. *China Scientific Data*, 5(3):303—312(in Chinese with English abstract).
- Ellis, E., Ramankutty, N., 2008. Putting People in the Map: Anthropogenic Biomes of the World. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 6(8):439—447. <https://doi.org/10.1890/070062>
- FAO, IIASA, 2023. Harmonized World Soil Database version

- 2.0. Rome and Laxenburg. <https://doi.org/10.4060/cc3823en>
- Guo, S.Z., Bai, H.Y., Meng, Q., et al., 2018. Landscape Pattern Phange and Its Response to Anthropogenic Disturbance in the Qinling Mountains During 1980 to 2015. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 29(12):4080–4088 (in Chinese with English abstract).
- HJ 1173—2021, 2021. Technical Specification for Investigation and Assessment of National Ecological Status:Ecosystem Services Assessment. Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, Beijing (in Chinese).
- Huang, Z.A., Chen, Y.B., Zheng, Z.H., et al., 2023. Spatiotemporal Coupling Analysis Between Human Footprint and Ecosystem Service Value in the Highly Urbanized Pearl River Delta Urban Agglomeration, China. *Ecological Indicators*, 148:110033. <https://10.1016/j.ecolind.2023.110033>
- Ji, Y.H., Zhou, G.S., Wang, S.D., et al., 2021. Evolution Characteristics and Its Driving Forces Analysis of Vegetation Ecological Quality in Qinling Mountains Region from 2000 to 2019. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 45(6): 617–625(in Chinese with English abstract).
- Li, S., Wu, J., Gong, J., et al., 2018. Human Footprint in Tibet: Assessing the Spatial Layout and Effectiveness of Nature Reserves. *Science of The Total Environment*, 621: 18–29. <https://10.1016/j.scitotenv.2017.11.216>
- Li, X., Li, D. R., Xu, H. M., et al., 2021. Intercalibration between DMSP/OLS and VIIRS Night-Time Light Images to Evaluate City Light Dynamics of Syria's Major Human Settlement during Syrian Civil War. *Remote Sensing of Night-Time Light*. London, Routledge, 80–97. <https://doi.org/10.4324/9781003169246-5>
- Liu, D.Q., Cao, E.J., Zhang, J.X., et al., 2020. Spatiotemporal Pattern of Water Conservation and Its Influencing Factors in Bailongjiang Watershed of Gansu. *Journal of Natural Resources*, 35(7): 1728–1743(in Chinese with English abstract).
- Liu, T., Ren, C., Zhang, S., et al., 2022. Coupling Coordination Analysis of Urban Development and Ecological Environment in Urban Area of Guilin Based on Multi-Source Data. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(19):12583. <https://10.3390/ijerph191912583>.
- Ma, L., Wang, C. M., Wang, L. Y., et al., 2023. Study of Spatiotemporal Variation and Driving Factors of Habitat Quality in the Northern Foothills of the Qinling Mountains: a Case Study of Xi'an, China. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 11: 1284281. <https://doi.org/10.3389/fevo.2023.1284281>
- Peng, S.Z., 2020. 1km Monthly Precipitation Dataset for China (1901–2023). National Tibetan Plateau / Third Pole Environment Data Center. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3114194>
- Peng, S.Z., 2022. 1 km Monthly Potential Evapotranspiration Dataset in China (1901–2023). National Tibetan Plateau / Third Pole Environment Data Center. <https://doi.org/10.11866/db.loess.2021.001>
- Peng, J.B., Shen, Y.J., Jin, Z., et al., 2023. Key Thoughts on the Study of the Eco-Geological Environment System in Qinling Mountains. *Acta Ecologica Sinica*, 43(11):4344–4358(in Chinese with English abstract).
- Reid, W. V., Mooney, H. A., Cropper, A., et al., 2005. Ecosystems and Human Well-being-Synthesis: A Report of the Millennium Ecosystem Assessment. Island Press, Washington, D.C.
- Ren, Z. G., Tian, Z. H., Wei, H. T., et al., 2022. Spatiotemporal Evolution and Driving Mechanisms of Vegetation in the Yellow River Basin, China during 2000–2020. *Ecological Indicators*, 138: 108832. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108832>
- Sanderson, E.W., Jaiteh, M., Levy, M.A., et al., 2002. The Human Footprint and the Last of the Wild: the Human Footprint is a Global Map of Human Influence on the Land Surface, Which Suggests that Human Beings Are Stewards of Nature, Whether We Like It or Not. *BioScience*, 52(10): 891–904. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2002\)052\[0891:thfat\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2002)052[0891:thfat]2.0.co;2)
- Sharp, R., Chaplin-Kramer, R., Wood, S., et al., 2018. In-VEST User's Guide.
- Shen, Y.J., Chen, X., Peng, J.B., et al., 2024. Background Characteristics of Ecological Geological Environment System in the Qinling Mountains and Assumption of Its Theoretical System. *Earth Science*, 49(6):2103–2119(in Chinese with English abstract).
- Si, F., Li, K., Huang, T. L., et al., 2024. Temporal and Spatial Variation in Atmospheric Wet Deposition of Nutrients and Organic Matter at the Southern and Northern Foothills of the Qinling Mountains. *Water Science & Technology*, 90(2): 631–648. <https://doi.org/10.2166/wst.2024.237>
- Sun, Y.H., Zhang, S.R., Xu, Q.H., 2022. Pollen-Based Land Cover Changes Reveal Temporal and Spatial Differences of Human Activity in North-Central China During the Holocene. *Catena*, 219:106620. <https://10.1016/j.catena.2022.106620>
- Terrado, M., Sabater, S., Chaplin-Kramer, B., et al., 2016. Model Development for the Assessment of Terrestrial and Aquatic Habitat Quality in Conservation Planning. *Science of The Total Environment*, 540:63–70. <https://https://>

- doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.03.064
- Woolmer, G., Trombulak, S.C., Ray, J.C., et al., 2008. Rescaling the Human Footprint: A Tool for Conservation Planning at an Ecoregional Scale. *Landscape and Urban Planning*, 87(1):42–53. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2008.04.005>
- Wang, X.C., 2022. Evolution of Ecosystem Services of Weihe River Basin in Shaanxi Qinling Mountain based on InVEST Model (Dissertation). Northwest University, Xi'an, 30 (in Chinese with English abstract).
- Wu, W.Q., Zhao, Y., Tian, H.W., et al., 2023. Spatio-Temporal Variation Characteristics and Driving Mechanism of Habitat Quality of Qinling Mountains in Recent 40 Years. *Journal of Earth Environment*, 14(4):488–504 (in Chinese with English abstract).
- Wu, Y., Wu, Y.M., Gao, B.B., et al., 2023. Spatial Relationship between Human Activity Intensities and Ecosystem Services Value in Chengdu-Chongqing Urban Agglomeration. *Research of Soil and Water Conservation*, 30(1):173–182 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Z.H., Wei, H.J., Fan, W.G., et al., 2019. Relationships Between Ecosystem Services and Human Well-Being Changes Based on Carbon Flow: A Case Study of The Manas River Basin, Xinjiang, China. *Ecosystem Services*, 37, 100934. <https://10.1016/j.ecoser.2019.100934>.
- Yang, J., Huang, X., 2021. The 30 m Annual Land Cover Dataset and Its Dynamics in China from 1990 to 2019. *Earth System Science Data*, 13(8):3907–3925. <https://10.5194/essd-13-3907-2021>
- Yang, Y., Zhu, X., 2024. Distribution and Change Characteristics of Ecosystem Services in Highly Urbanized Areas along Gradients of Human Activity Intensity: A Case Study of Shenzhen City, China. *Sustainability*, 16(6):2543. <https://10.3390/su16062543>.
- Zhang, C.X., Xie, G.D., Yang, Q.K., et al., 2008. Influence of Human Activities on the Value of Ecosystem Services: Case Study of Zhifanggou Watershed. *Resources Science*, 30(12):1910–1915 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, X.Y., Ning, X.G., Wang, H., et al., 2022. Impact of Human Footprint on Landscape Fragmentation in the Northeastern China Tiger and Leopard National Park. *Acta Ecologica Sinica*, 42(11):4688–4702 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y.Z., Yin, H.R., Zhu, L.Q., et al., 2021. Landscape Fragmentation in Qinling-Daba Mountains Nature Reserves and Its Influencing Factors. *Land*, 10(11): 1124. <https://doi.org/10.3390/land10111124>
- Zhang, Z., 2022. Research on the Carbon Source/Sink Characteristics of the Ecosystem on the Southern Slope of the Qilian Mountains and Its Effect Factors of Carbon Pool (Dissertation). Qinghai Normal University. Xining, 55–56 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, B.J., Liu, X.F., Zhou, Z.X., 2022. Effects of Human Activities on Ecosystem Quality in Qinling-Daba Mountains: A Case Study of Hanzhong city. *Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition)*, 50(4):45–58 (in Chinese with English abstract).

中文参考文献

- 陈姗姗, 刘康, 李婷, 等, 2016. 基于 InVEST 模型的商洛市水土保持生态服务功能研究. *土壤学报*, 53(3):800–807.
- 崔晓临, 白红英, 王涛, 2013. 秦岭地区植被 NDVI 海拔梯度差异及其气温响应. *资源科学*, 35(3):618–626.
- 段群滔, 罗立辉, 2020. 1990–2015 年青藏高原人类足迹数据集. *中国科学数据(中英文网络版)*, 5(3):303–312.
- 郭少壮, 白红英, 孟清, 等, 2018. 1980—2015 年秦岭地区景观格局变化及其对人为干扰的响应. *应用生态学报*, 29(12):4080–4088.
- HJ 1173—2021, 2021. 全国生态状况调查评估技术规范——生态系统服务功能评估. 北京: 中华人民共和国生态环境部.
- 汲玉河, 周广胜, 王树东, 等, 2021. 2000–2019 年秦岭地区植被生态质量演变特征及驱动力分析. *植物生态学报*, 45(6):617–625.
- 柳冬青, 曹二佳, 张金茜, 等, 2020. 甘肃白龙江流域水源涵养服务时空格局及其影响因素. *自然资源学报*, 35(7):1728–1743.
- 彭建兵, 申艳军, 金钊, 等, 2023. 秦岭生态地质环境系统研究关键思考. *生态学报*, 43(11):4344–4358.
- 申艳军, 陈兴, 彭建兵, 等, 2024. 秦岭生态地质环境系统本底特征及研究体系初步构想. *地球科学*, 49(6):2103–2119.
- 王晓晨, 2022. 基于 InVEST 模型的陕西秦岭(渭河流域)生态系统服务评估(博士学位论文). 西安: 西北大学, 30.
- 武文琦, 赵燕, 田瀚文, 等, 2023. 近 40 a 秦岭生境质量时空变化特征及驱动机制. *地球环境学报*, 14(4):488–504.
- 武燕, 吴映梅, 高彬嫫, 等, 2023. 成渝城市群生态系统服务价值与人类活动强度空间关系. *水土保持研究*, 30(1):173–182.
- 张彩霞, 谢高地, 杨勤科, 等, 2008. 人类活动对生态系统服务价值的影响——以纸坊沟流域为例. *资源科学*, 30(12):1910–1915.
- 张晓宇, 宁晓刚, 王浩, 等, 2022. 人类足迹对东北虎豹国家公园景观破碎化的影响. *生态学报*, 42(11):4688–4702.
- 张卓, 2022. 祁连山南坡生态系统碳源/汇特征及碳库影响因素研究(博士学位论文). 西宁: 青海师范大学, 55–56.
- 郑碧军, 刘晓芳, 周忠学, 2022. 秦巴山区人类活动对生态系统质量的影响——以汉中市为例. *陕西师范大学学报(自然科学版)*, 50(4):45–58.