苏军德,赵晓冏,李国霞,等.县域尺度下甘南州生境质量时空演变及驱动力分析 [J]. 中国环境科学, 2025,45(12):6779-6792.
Su J D, Zhao X J, Li G X, et al. Analysis of spatiotemporal evolution and driving forces of habitat quality in Gannan Tibetan Autonomous Prefecture at the County-level Scale [J]. China Environment Science, 2025,45(12):6779-6792.

# 县域尺度下甘南州生境质量时空演变及驱动力分析

苏军德[1*],赵晓冏[2,3],李国霞[1],李栋年[1] (1.甘肃有色冶金职业技术学院,甘肃 金昌 737100；2.甘肃省生态环境科学设计研究院,甘肃 兰州 730000；3.中国科学院西北生态环境资源研究院,甘肃 兰州 730000)

**摘要**：基于 InVEST 模型,并综合运用参数最优地理探测器和地理加权回归模型(GWR)在县域尺度下动态分析了 2000~2020 年甘南州生境质量的时空演变特征及其驱动机制.结果表明: 1)2000~2020 年,生境质量持续退化,年均下降率为 0.0016a$^{-1}$,空间分布相对稳定,呈西南高,西北-东南低的分布特征,热点连片分布于玛曲县和碌曲县,冷点以带状或斑块状集中于城镇周边及路网密集区域,以建设用地和耕地为主; 2)土地利用类型相互转换对生境质量产生了消极影响,生境质量指数累计下降 0.031,林地、耕地向草地以及耕地向林地是促使生境质量改善的主要转换类型,但生态用地向生活生产用地、草地向耕地的转换规模在不断扩大,年均转换面积分别为 20.22 和 194.05km$^2$,生境退化风险在进一步加剧; 3)高程(0.459)、年均温度(0.433)、年均降水(0.349)、年均蒸发量(0.345)、GDP(0.274)和人口数量(0.269)是生境质量分异的主要驱动因子,且各因子间呈非线性增强或双因子增强,高程与其余因子交互作用最强,贡献率均在 45%以上,对生境质量空间分布具有决定性影响; 4)不同因子在空间上对生境质量的影响具有显著差异($P$<0.05),年均温度、年均蒸发量、GDP 和人口数量对生境质量主要产生负向作用,但高程和降水对生境质量正向效应显著,3200m 以下区域,生境质量较小,维持在 0.045~0.203 之间,退化相对严重,在 0.146~0.232 之间波动,3200m 以上区域,降水丰沛、生境质量较高(0.383~0.759),但此区域对气候变化较为敏感,草地连续性不高,生境以点状退化.未来在环境保护中,应严格管控建设用地扩张,严格落实耕地用途管制制度,综合考虑不同驱动因素特点,采取差异化的多元调控策略,同时关注高海拔区域气候变化对生境质量的影响,通过精细化调控人地关系和应对气候变化的策略,从整体上推动生境质量提质增效.

**关键词**：生境质量；驱动机制；时空分布；地理探测器；地理加权回归分析；甘南州
**中图分类号**：X171.1 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2025)12-6779-14

**Analysis of spatiotemporal evolution and driving forces of habitat quality in Gannan Tibetan Autonomous Prefecture at the county-level scale.**

SU Jun-de[1*], ZHAO Xiao-jiong[2,3], LI Guo-xia[1], LI Dong-nian[1] (1.Gansu Vocational & Technical College of Nonferrous, Jinchang 737100, China；2.Gansu Academy of Ecological Environment Design and Research, Lanzhou 730000, China；3.Nourthwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China), *China Environment Science*, 2025,45(12)：6779~6792

**Abstract**：Based on the InVEST model and integrating the use of the Geodetector and Geographically Weighted Regression (GWR) model, this paper dynamically analyzed the spatio-temporal evolution characteristics and driving mechanisms of habitat quality in Gannan Prefecture at the county scale from 2000 to 2020. The results show that: 1) From 2000 to 2020, habitat quality continuously deteriorated, with an average annual decline rate of 0.0016a$^{-1}$. The spatial distribution was relatively stable, showing a pattern of high in the southwest and low in the northwest-southeast. Hotspots were concentrated in Maqu County and Luqu County, while coldspots were distributed in a band or patch form around towns and in areas with dense road networks, mainly consisting of construction land and cultivated land. 2) The mutual conversion of land use types had a negative impact on habitat quality, with a cumulative decline of 0.031 in the habitat quality index. The conversion from forest land and cultivated land to grassland and from cultivated land to forest land were the main types that improved habitat quality. However, the conversion from ecological land to living and production land and from grassland to cultivated land was continuously expanding, with an average annual conversion area of 20.22 and 194.05km$^2$ respectively, further intensifying the risk of habitat degradation. 3) Elevation (0.459), average annual temperature (0.433), average annual precipitation (0.349), average annual evaporation (0.345), GDP (0.274), and population (0.269) were the main driving factors of habitat quality differentiation, and the interaction between these factors was nonlinearly enhanced or double-factor enhanced. The interaction between elevation and other factors was the strongest, with a contribution rate of over 45%, which had a decisive influence on the spatial distribution of habitat quality. 4) The impact of different factors on habitat quality in space was significantly different ($P$ < 0.05). Average annual temperature, average annual evaporation, GDP, and population mainly had negative effects on

**收稿日期**：2025-05-06
**基金项目**：甘肃省自然科学基金资助项目(25JRRC001,22JR5RC1081);甘肃省陇原青年英才支持计划项目([2023]11 号)
* 责任作者, 教授, sujd2009@163.com.

habitat quality, while elevation and precipitation had significant positive effects. Below 3200m, habitat quality was relatively low, ranging from 0.045 to 0.203, with severe degradation fluctuating between 0.146 and 0.232. Above 3200m, precipitation was abundant and habitat quality was relatively high (0.383~0.759), but this area was more sensitive to climate change, with low grassland continuity and point-like habitat degradation. In future environmental protection, strict control over the expansion of construction land should be implemented, the system of land use control for cultivated land should be strictly enforced, and differentiated and diversified regulatory strategies should be adopted considering the characteristics of different driving factors. At the same time, attention should be paid to the impact of climate change on habitat quality in high-altitude areas, and through refined regulation of the human-land relationship and strategies to address climate change, the overall quality and efficiency of habitat should be improved.

**Key words**：habitat quality；driving mechanism；spatio-temporal distribution；geodetector；GWR；Gannan Prefecture

在全球气候变暖背景下,深入探索区域生境质量时空演变特征及其驱动力,对于生态安全构建、生物多样性保护以及生态文明建设和可持续发展具有重要意义.目前,对生境质量的评估方法基本可分为单一遥感生态指数和综合模型法两种,然而单一遥感生态指数,如归一化植被指数(NDVI)、叶面积指数(LAI)、植被覆盖度(FVC)、增强植被指数(EVI)等对生境质量的评价存在局限性和偶然性[1],难以全面准确的反映区域生境质量的真实情况.随着遥感技术准确性及其效率的提升,综合评价模型(SoLVES 模型、HIS 模型、MaxEnt 模型、InVEST 模型等)已基本实现了对省际[2]、县域[3]、流域[4]、自然保护地[5]等不同尺度生境质量时空演变的可视化、精细化和定量化评价.其中 InVEST 模型由于其空间分析能力强、评估精度高、数据易获取、操作较简单,且可与土地利用类型研究相结合等优势[6],被众多学者[7-8]广泛应用于不同区域生境质量的评价.在驱动力探究时,不同因子间可能因交互作用而对生境质量产生额外影响,现有研究多采用地理探测器分析多因子之间的交互作用,探究其主要影响因素,如王洋等[9]、苏军德等[10] 、Torn 等[11]运用地理探测器分别探析了塔里木河流域、祁连山国家自然保护区和波罗的海北部三类海洋底栖生境质量的主要驱动因素.但不同驱动因子对生境质量的影响存在时空异质性,仅用地理探测器难以反映其影响程度的时空动态性,地理加权归回模型(GWR)可引入空间位置进行回归分析,能更加全面准确的刻画不同影响因子对生境质量影响程度的时空异质性规律[12],有效弥补上述模型的不足,已有研究[13]采用 GWR 模型刻画了土耳其通卡河亚流域土地利用对景观敏感性影响程度的空间分布规律.由此可见,综合运用地理探测器和 GWR 深入分析生境质量时空分异特征及其影响因素和驱动机制,捕捉其影响程度空间变化的差异性,对区域生境质量变化提供准确而全面的解释,助力区域绿色可持续发展至关重要.

甘南藏族自治州(简称甘南州)作为黄河、长江的水源涵养区和补给区,是国家重要的生态主体功能区和生态文明先行示范区[14],其生态环境系统对气候变化和人类活动较为敏感,尤其在城市化进程加速、人类活动增多以及全球气候变化等多种因素的干扰下,甘南州生态系统出现了诸如草地退化、生物多样性减少、土壤质量恶化、冻土消融等一系列生态环境问题.为防止甘南州草地退化和林地破坏,政府陆续实施了退耕还林、退牧还草、草原生态补偿等一系列生态保护工程[15],但关于生态工程实施后生境质量动态演变及其影响因素和驱动机制的分析,现有研究仅对甘南州生境质量时空特征进行了定性判断,但未对其影响因素和驱动机制进行探讨,且多基于流域尺度[16],不能准确揭示研究区生境质量的局部演变.因此,本研究基于 2000~2020 年土地利用类型数据,利用 InVEST 模型从县域尺度定量评估研究区生境质量的时空演变特征,并综合运用参数最优地理探测器和 GWR 模型深入探究影响研究区生境质量的影响因素及其驱动机制,旨在为研究区生态空间的合理规划、生态补偿政策的精准实施以及流域生态文明建设和高质量发展提供科学参考.

## 1 数据来源与研究方法

### 1.1 研究区概况

甘南州 (100°45′30″~104°45′30″E, 33°6′30″~35°34′00″N)位于甘肃省西南部,全域下辖 1 市 7 县(合作市、玛曲县、碌曲县、迭部县、舟曲县、夏河

县、卓尼县和临潭县),总面积约 4.5 万 km$^2$[17],占甘肃省总面积的 10.5%.地貌类型复杂多样,交错分布着平原、丘陵、山地和台地,大部分区域海拔介于2500~4000m 之间,属高原大陆性气候,年均气温介于 1~3℃之间,且垂直分异明显,年均降水量在 400~700mm 之间,呈“南多北少”的空间分布格局[18].区域内土地覆被类型和植被资源丰富,主要包括草地、森林、灌丛和沼泽,其中草地面积约 2.72 万 km$^2$,占研究区总面积的 71.08%,是我国西北部重要的生物多样性保护区和生态屏障功能区[19].境内水系发达,“一江三河” (黄河及其支流洮河、白龙江和大夏河)贯穿全域,流域面积达 470km$^2$,对维系长江黄河水量稳定和水资源资源安全具有不可替代的作用.土壤类型以黑毡土、草毡土和草甸土为主.

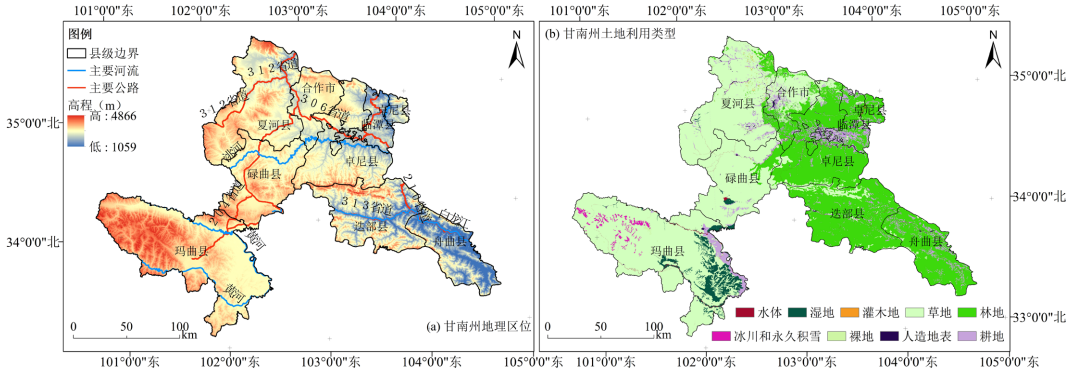



图 1　研究区概况示意

Fig.1　Overview of the study area

## 1.2　数据来源

2000 年、2010 年、2020 年土地利用数据来源于国家冰川冻土沙漠科学数据中心(http://www.ncdc.ac.cn),空间分辨率为 30m×30m,总体精度高于83.50%,Kappa 系数在 0.78 以上,分为耕地、林地、草地、灌木地、湿地、水体、裸地、人造地表、冰川和永久积雪 9 类;高程(DEM)数据来自国家地球科学数据中心(https://www.geodata.cn),空间分辨率为30m×30m;夜间灯光指数、GDP、人口数量等社会经济数据来源于国家青藏高原数据中心(https://data.tpdc.ac.cn/),分辨率为 1km×1km;道路数据、水系数据来源于 OpenStreetmap 数据平台;年均降水、年均气温、NDVI、NPP、坡度、坡向、山体阴影、蒸发量、土壤侵蚀强度等自然环境数据来源于中国科学院资源环境中心(https://www. resdc.cn),分辨率均为 1km×1km.为确保不同数据源的统一性,避免后续分析的不确定性,所有数据均使用地理坐标系 WGS_1984,投影坐标系 WGS_1984_UTM_ZONE_46N,并利用 ArcGIS 10.7 重采样到统一分辨率 30m×30m.

## 1.3　研究方法

**1.3.1　生境质量空间量化**　运用 InVEST 模型中的生境质量(Habitat Quality)模块,根据甘南州土地利用变化,结合威胁因子和生态敏感性,计算得到 2000 年、2010 年和 2020 年研究区生境质量的空间分布,其值在 0~1 之间,越接近 1,生境质量越好.计算公式如下[20]:

$$Q_{xj}=H_j\left(1-\frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z+k^z}\right) \tag{1}$$

式中:$Q_{xj}$ 为地类 $j$ 中栅格 $x$ 的生境质量;$D_{xj}$ 为生境退化指数;$k$ 和 $z$ 分别为饱和常数和归一化常数,本文中 $z$ 值取 0.05.结合研究区实际情况,选择道路(国道、省道、城市道路)、耕地、裸地和人造地表(城镇用地、农村居民点、其他建设用地)作为威胁因子,威胁因子参数和生境对威胁因子敏感度参数在专家建议和以往研究成果[21-22]的基础上,在±30%以内上下调整(单因子轮换),模拟运行后比较参数变化前后生境质量的大小、等级以及空间分布格局的差异程度,当生境质量相对变化率在 5%以内时,即确定为该参数值.最终参数如表 1 和表 2.

**1.3.2　空间自相关**　空间自相关用于衡量变量(文中指生境质量)属性与相邻空间点之间的相互依赖关系,其中全局空间自相关主要度量变量在整个区域内的空间自相关程度,用 Moran’s $I$ 指数表示,局部

空间自相关($I_i$)主要反映变量在局部地区的聚集程度.计算公式如下[23]:

$$\text{Moran's} = \frac{n\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\boldsymbol{w}_{ij}\left(x_i-\bar{x}\right)\left(x_j-\bar{x}\right)}{\left(\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\boldsymbol{w}_{ij}\right)\sum_{i=1}^{n}\left(x_i-\bar{x}\right)^2} \quad (2)$$

$$I_i = \frac{\left(x_j-\bar{x}\right)\sum_{j=1}^{n}\boldsymbol{w}_{ij}\left(x_j-\bar{x}\right)}{\sum_{i=1}^{n}\left(x_j-\bar{x}\right)^2} \quad (3)$$

式中:Moran's $I$ 是全局莫兰指数,取值范围为[−1,1],值为正表示正相关,值为负表示负相关,值越大,空间自相关越强,值为 0 表示变量在空间中随机分布;$x_i$ 和 $x_j$ 分别表示 $i$ 和 $j$ 单元的变量值;$n$ 为空间单元总数;$\boldsymbol{w}_{ij}$ 为权重矩阵;$I_i$ 为局部空间自相关指数,值大于 0 表示空间单元局部相似,值小于 0 表示空间单元局部相异,值等于 0 表示空间单元随机分布.

**表 1 研究区生境威胁源及相关参数**

Table 1 Habitat threat sources and relevant parameters in the study area

| 威胁因子 | 最大影响距离 (km) | 权重 | 空间衰退类型 |
|---|---|---|---|
| 道路 | 3 | 0.7 | 指数衰减 |
| 耕地 | 4 | 0.5 | 线性衰减 |
| 裸地 | 2 | 0.4 | 指数衰减 |
| 人造地表 | 6 | 1.0 | 指数衰减 |

**表 2 研究区各土地类型生境适宜度及对威胁源的敏感度**

Table 2 Habitat suitability and sensitivity to threat sources of each land type in the study area

| 土地利用类型 | 生境适宜度 | 敏感度 | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 道路 | 耕地 | 裸地 | 人造地表 |
| 耕地 | 0.6 | 0.4 | 0 | 0.5 | 0.5 |
| 林地 | 1.0 | 0.5 | 0.6 | 0.3 | 0.8 |
| 草地 | 0.9 | 0.4 | 0.4 | 0.6 | 0.6 |
| 灌木地 | 0.9 | 0.3 | 0.4 | 0.3 | 0.6 |
| 湿地 | 0.7 | 0.3 | 0.5 | 0.5 | 0.7 |
| 水体 | 0.8 | 0.6 | 0.6 | 0.4 | 0.7 |
| 人造地表 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 裸地 | 0.2 | 0.1 | 0.2 | 0 | 0.1 |
| 冰川和永久积雪 | 0 | 0 | 0 | 0.1 | 0 |

1.3.3 地理探测器 地理探测器是探究多个自变量对因变量(文中指生境质量)贡献率的一种方法,其中单因子探测可有效获得单个影响因素对生境质量的解释力,交互探测可探求两两因子相互作用对生境质量的解释力.本文参考已有研究成果[24],结合研究区实际情况,选取年均气温、年均降水、NDVI、NPP、坡度、坡向、蒸发量、海拔、土壤侵蚀强度、夜间灯光、GDP、人口数量、山体阴影等 13 个可能影响生境质量的自然环境因素和社会经济因素对甘南州平均生境质量(2000 年、2010 年、2020 年生境质量的平均值)的驱动力进行探析.在 ArcGIS 10.7 中生成 1895 个样点,去除奇异值后,对剩余的 1468 个样点在 R 语言中运用自然断点分类、几何间隔分类、相等间隔分类、标准差分类及分位数分类 5 种方法,间隔设置为 3~10 类,选取 $q$ 值最高的参数组合进行空间离散化.其计算公式如下[25]:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^{L} N_h \delta_h^2}{N\delta^2} \quad (4)$$

式中:$q$ 为影响因子对生境质量的解释力强度,其值在 0~1 之间,值越大,其对生境质量的影响越强;$N_h$ 和 $N$ 分别为层 $h$ 和全域样本数量;$\delta_h^2$ 和 $\delta^2$ 分别是层 $h$ 和全域生境质量的方差;$h$=1,2,3…$L$,为生境质量和自变量的分层.

1.3.4 地理加权回归模型(GWR) GWR 通过引入地理差异性参数,同时设置带宽选择,对局部范围内因变量和生境质量进行差分回归,能很好的反映不同自变量对生境质量的空间异质性解释.模型表达式如下[26]:

$$Y_i = \sum_{j=1}^{k}\beta_{bwj}\left(\mu_i,\nu_i\right)x_{ij} + \beta_0\left(\mu_i,\nu_i\right) + \varepsilon_i \quad (5)$$

式中:$Y_i$ 表示因变量(文中指平均生境质量);$x_{ij}$ 表示自变量(文中指社会经济因素或自然环境因素);$\varepsilon_i$ 表示随机误差;($u_i$,$v_i$)和 $k$ 分别表示样本的空间坐标和空间单位总数;$\beta_0(u_i,v_i)$和$\beta_{bwj}(u_i,v_i)$分别表示 $i$ 点的截距和 $i$ 点 $j$ 变量的局部回归系数,回归系数绝对值越大,对生境质量的影响力越强.

1.3.5 生境贡献率 生境贡献率用于衡量土地利用变化对生境质量的影响,直观反映了某种地类转移前后致使生境质量产生变化的比率[9],计算公式如下:

$$r_{ij} = \frac{\left(Q_m - Q_n\right)\times S_i}{S}\times 100\% \quad (6)$$

式中:$r_{ij}$ 为地类 $i$ 转换为地类 $j$ 对生境质量的影响;$Q_{\mathrm{m}}$ 和 $Q_n$ 分别表示转化末期和初期的生境质量;$S$ 为研究区面积.

## 2　结果与分析

### 2.1　甘南州生境质量和生境退化度时空分布与演化趋势

为定量分析甘南州生境质量和生境退化度时空动态演变特征,参考《生态环境质量技术评价规范》(2015)和已有研究成果,将生境质量指数按 0.2 为间隔划分为低[0,0.2]、较低[0.2,0.4]、中等[0.4,0.6]、较高[0.6,0.8]和高[0.8,1.0] 5 个等级.从图 2(a,b,c)可以看出,2000~2020 年间,甘南州生境质量空间分布格局变化较小,局部高值区(西南)与广泛低值区(西北-东南)并存,其中高值区面积约占研究区总面积的 34.37%~38.19%,主要分布在玛曲县(均值为 $6.26\times10^3km^2$)、碌曲县(均值为 $2.02\times10^3km^2$)、夏河县(均值为 $1.98\times10^3km^2$)、迭部县(均值为 $1.28\times10^3km^2$)和卓尼县南部(均值为 $1.47\times10^3km^2$),这与研究区山地分布高度重合,且该地带海拔较高、人类活动较少,分布有大量的草地和水域,平均生境质量为 0.872;生境质量低值区主要分布在人类活动较为频繁的县(临潭县、舟曲县和卓尼县北部)、市(合作市)周边以及植被相对稀少的裸露地带,平均生境质量为 0.195,占研究区总面积的 37.09%~41.49%;中等(6.33%~7.18%)区域占比较小,以环状或带状分布于人类活动干扰缓冲带(城镇周边、道路沿线等)和自然梯度过渡区(山地-河谷交错带、湿地-草地边缘区等).总体来看,研究区生境质量在空间分布上的差异性,可能与人类活动以及自然因素有关.

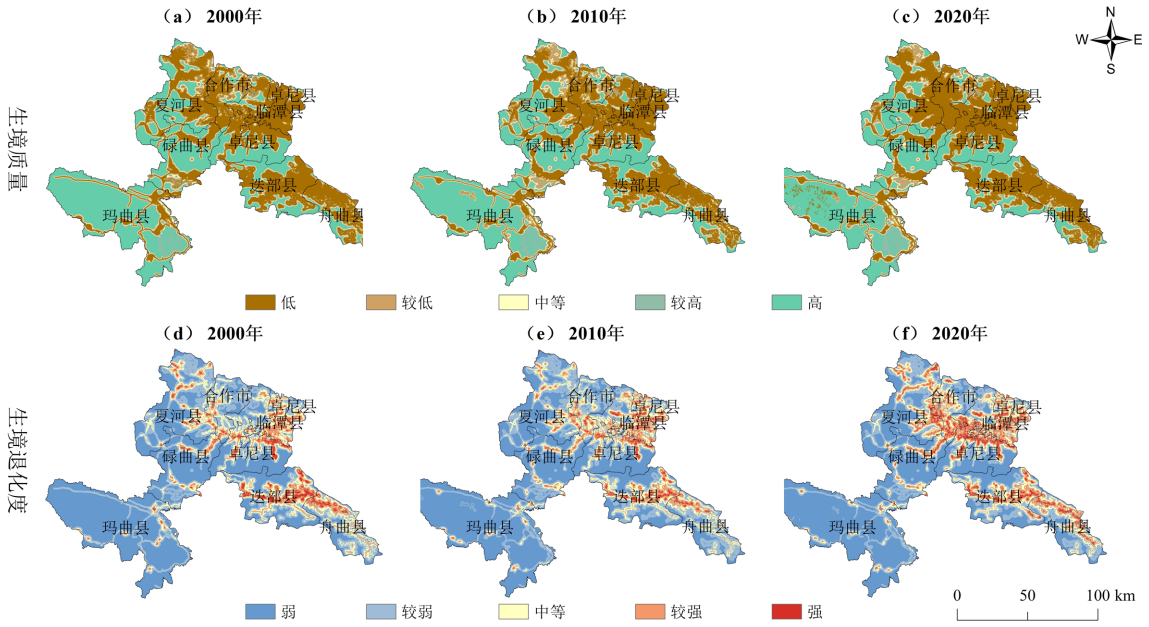



图 2　2000~2020 年甘南州生境质量和生境退化度空间分布

Fig.2　Spatial distribution of habitat quality and habitat degradation degree in Gannan Prefecture from 2000 to 2020

时间变化上,2000~2020 年间,甘南州生境质量整体上处于一般水平(均值为 0.470),且呈不显著下降趋势,由 2000 年的 0.481 下降至 2020 年的 0.450,年均下降率为 $0.0016a^{-1}$($P$>0.05).其中 2000~2010 年间生境质量以退化为主(降幅为 0.42%)、局部改善的变化趋势,高生境质量区域面积由 $1.43\times10^4km^2$ 减至 $1.35\times10^4km^2$,占比减小 2.53%,主要分布在玛曲县($598.97km^2$)和碌曲县($170.28km^2$);低生境质量面积占比由 38.68%减小至 37.09%,减小 $595.17km^2$,主要分布在夏河县($369.53km^2$)和舟曲县($199.87km^2$);生境质量改善类型以低→较低、较低→中等、中等→较高、较高→高为主,退化类型以高→较高、较低→低为主.相比前 10a,2010~2020 年间,生境质量持续退化,且降幅明显增大(6.05%),低生境质量区占比由 37.09%增至 41.49%,增加 $1.65\times10^3km^2$,主要分布在夏河县($555.24km^2$)、合作市($275.70km^2$)、玛曲县($242.30km^2$)和卓尼县($214.38km^2$);高生境质量区面积持续减小,由 $1.35\times10^4km^2$ 减至 $1.29\times10^4km^2$,主要分布在玛曲县($267.76km^2$)、夏河县($145.17km^2$)和卓尼县($128.83km^2$);生境质量改善类型以低→较低、较

高→高为主,合计转化面积 280.60km$^2$,退化类型以较低→低为主,转化面积 1198.45km$^2$;研究时段内,中等生境质量区域面积变化较为平稳,占比保持在6.17%~7.18%之间(表 3).

**表 3 甘南州生境质量等级转移矩阵(km$^2$)**

Table 3 Transition matrix of habitat quality grades in Gannan Prefecture(km$^2$)

| 年份 | 等级 | 2010 年 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 低 | 较低 | 中等 | 较高 | 高 |
| 2000 年 | 低 | 12855.47 | 1564.68 | 63.69 | 15.31 | 0.23 |
| | 较低 | 617.70 | 2136.08 | 949.54 | 35.82 | 9.05 |
| | 中等 | 208.00 | 234.92 | 1219.12 | 631.00 | 20.24 |
| | 较高 | 124.44 | 144.01 | 178.46 | 1683.84 | 479.93 |
| | 高 | 98.60 | 279.10 | 281.64 | 618.94 | 13040.28 |
| | 等级 | 2020 年 | | | | |
| | | 低 | 较低 | 中等 | 较高 | 高 |
| 2010 年 | 低 | 13662.41 | 166.66 | 42.49 | 17.01 | 12.26 |
| | 较低 | 1198.45 | 2988.04 | 95.96 | 29.00 | 46.35 |
| | 中等 | 393.15 | 350.42 | 1845.06 | 66.02 | 37.01 |
| | 较高 | 104.00 | 174.76 | 230.86 | 2360.16 | 113.94 |
| | 高 | 193.25 | 122.55 | 158.30 | 398.99 | 12668.78 |

按自然断点法将生境退化度划分为弱退化(0, 0.044)、较弱退化(0.044, 0.120)、中等退化(0.120, 0.212)、较强退化(0.212, 0.338)和强退化(0.338, 0.554)5 个类型(图 2(d, e, f)).甘南州生境退化度以弱退化为主,其面积占研究区总面积的 45.75%~48.03%,强退化区主要分布在合作市、卓尼县、临潭县、舟曲县和迭部县,这些区域由于人口密度较大、人类活动频繁,且矿产、能源资源丰富,高度分散着各种威胁(如碎片化的城区、高密度的路网以及分散化的农田等),对生态系统造成了严重的干扰,生境退化度相对较高,尤其是位于农林交错带的临潭县,生态基地薄弱(生境质量均值为 0.059),农田的扩张和早期不合理的人类活动(过渡放牧、乱砍乱伐)致使草场退化,生态系统被压缩[27],生境退化相对严重(生境退化度均值为 0.209).时间上,2000~2020 年间甘南州生境质量持续退化,生境退化度分别为0.078(2000 年)、0.081(2010 年)、0.092(2020 年),表现为研究区西北-东南沿线(合作市、卓尼县、临潭县、迭部县和舟曲县)强和较强退化区域不断扩张,由点状或斑状的离散化分布向集中连片的带状化分布发展,与研究区耕地、矿区和农村居民点的分布高度重合,这一过程可能与研究区城市化的快速推进、水电开发及农田的不断扩张密切相关.总体来说,近 20a 甘南州生境质量出现了一定的退化趋势,尤其是 2010~2020 年间,生境退化较为明显.因此,有必要继续进行生态系统健康监测,并进一步加强生态环境的保护和改善工作.

## 2.2 甘南州生境质量和生境退化度热点分析

甘南州 3 期生境质量全局莫兰指数(global Moran's $I$)在 1%的置信水平上显著为正,其值分别为 0.931、0.932、0.934,在空间上显著聚集且呈增强趋势.从聚类/异常值分析(Anselin Local Moran $I$)结果(图 3(a, b, c))可以看出,研究区生境质量以“高-高”聚集(平均占比 39.15%)和“低-低”聚集(平均占比 24.22%)为主, “低-高”聚集和“高-低”聚集分布区域极少,热点(高-高聚集)区域连片分布于黄河湿地国家自然保护区和尕海则岔国家级自然保护区(玛曲县和碌曲县),此区域物种多样性丰富、多珍稀野生物种,是黄河上游关键的生态系统服务源地,其余地区呈不连续的片状分布,多以自然保护区为核心(如迭部县北部的阿夏自然保护区),周边由于高强度的人类活动(如密集城镇化、采矿、重工业、集约化农业)、资源过度开发(过渡放牧、滥砍滥伐)等导致的物种丰富度较低,生态连通性较差;研究时段内热点区域不断缩小,由 1.52×10$^4$km$^2$(2000 年)减至 1.41×10$^4$km$^2$(2020 年),累计减少 1108.90km$^2$,值得注意的是,研究区西南部玛曲县热点区域降幅较大(-10.40%),可能是因为气候变化引起的冻土消融和不合理的人类活动(超载放牧等)引发的草地旱化和黄河沿岸沙化带进一步扩张所致.冷点(低-低聚集)区域持续扩张并呈现出向城镇经济发展中心聚集的趋势,20a 间,累计增加 1455.81km$^2$(增幅为17.05%),尤其在西北-东南沿线的市、县(合作市、临潭县、卓尼县、迭部县、舟曲县)表现较为明显.总体来看,甘南州生境质量热点区域整体分布较为破碎,多处被冷点分割,究其原因是研究区早期因资源开采、水电开发、滥采滥挖等不合理的人类活动和气候突变对生态环境造成了破坏,进而导致生境质量不高.

2000~2020 年间,甘南州生境退化度以低-低聚集为主(平均占比 44.40%),热点(高-高聚集)区域分布较为破碎(图 3d, e, f),以线状或片状集中分布于威胁源密集的合作市、临潭县、卓尼县、迭部县和舟

曲县,合计占热点面积的 77.81%~79.56%,主要原因是这些区域人口密集,路网发达,且耕地与矿产资源遍布,多重因素叠加致使人类生产、开发活动频繁,对当地生态环境产生了负面影响[28],但不同时期所占比例无显著变化($P$>0.05),分别占研究区总面积的12.06%、13.31%、15.94%.

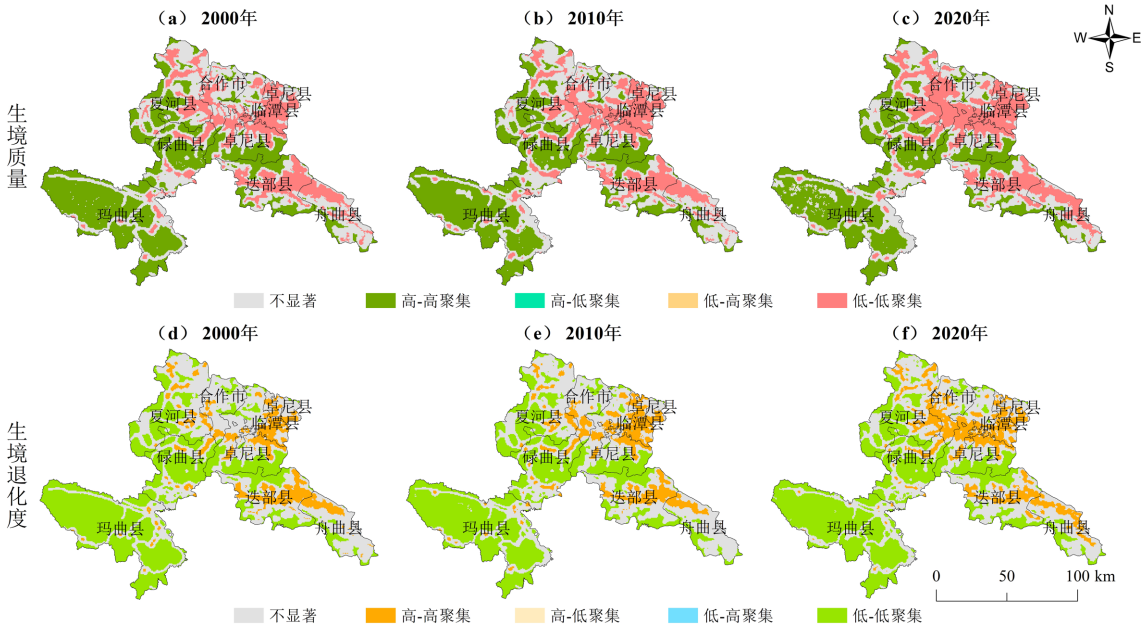



图 3　2000~2020 年甘南州生境质量和生境退化度 LISA 集散图

Fig.3　LISA aggregation and dispersion diagram of habitat quality and habitat degradation degree in Gannan Prefecture from 2000 to 2020

## 2.3　土地利用变化对生境质量的贡献度

生境贡献率正负直观反映了不同土地利用类型转换过程对生境产生的效应,其值绝对值大小精准量化了土地类型转换对生境的影响强度[29],研究区由于不同地类间转换面积过小,生境贡献率数值较小,但从生境质量增减可以看出(图 4),2000~2010 年间,促使生境质量正向改善的地类转换面积为478.94km$^2$,合计贡献率 0.275%,其中耕地→林地(0.047%)、耕地→草地(0.061%)、林地→草地(0.130%)的生境贡献率较高,分别转化 137.25、54.9 和201.65km$^2$;致使生境质量降低的地类转换主要是生态用地向生活生产用地的转化,如草地→耕地、草地→人造地表、林地→耕地、林地→人造地表、湿地→耕地、湿地→人造地表、水体→耕地、水体→人造地表,合计转化面 876.45km$^2$,累计贡献率−0.467%,其中草地→耕地的影响最为显著(−0.220%),转化面积 242.60km$^2$,其次为草地→水体(−0.072%)、草地→裸地(−0.054%).2010~2020 年间,生态用地(林地、草地、湿地、水体)向生活生产用地(耕地、人工地表)的转化依然是主要的负效应,但其转化面积较小(461.55km$^2$),生境贡献率相对较小(合计贡献率−0.206%),草地→林地的转化(−0.681%)是引起生境质量下降的主要原因;促使生境质量提升的地类转换与前 10a 相同,但贡献率(0.242%)略有下降.总体来说,20a 间研究区生境质量持续下降,生态用地向工业用地、建设用地等威胁源转移会直接削弱生境质量,而威胁源用地逐步恢复为生态用地时,生境质量则相应提升,其中草地面积的增减对生境质量的提升或降低具有明显影响.

## 2.4　甘南州生境质量驱动因素分析

**2.4.1　单因子探测**　地理探测器单因子探测结果表明(图 5(a)),除坡向和山体阴影外,其余因子均通过了 0.01 的显著性检验,表明甘南州生境质量在时间演变和空间分布上的差异,是自然环境条件与社会经济发展因素相互作用的结果.按 $q$ 值从大到小依次排序为:海拔>年均温度>年均降水>年均蒸发量>GDP>人口数量>NPP>夜间灯光>土壤侵蚀度>坡度>NDVI>山体阴影>坡向,其中海拔的解释力最强,$q$ 值为 0.459,其次为年均温度(0.433)、年均降水(0.349)和年均蒸发量(0.345),是影响甘南州生境质

量空间分布的主要自然环境因子;GDP 和人口数量是影响生境质量时空分异的主要社会经济因素,但其解释力不及自然环境因素(海拔、年均降水、年均温度和年均蒸发量),$q$ 值分别为 0.274 和 0.268.

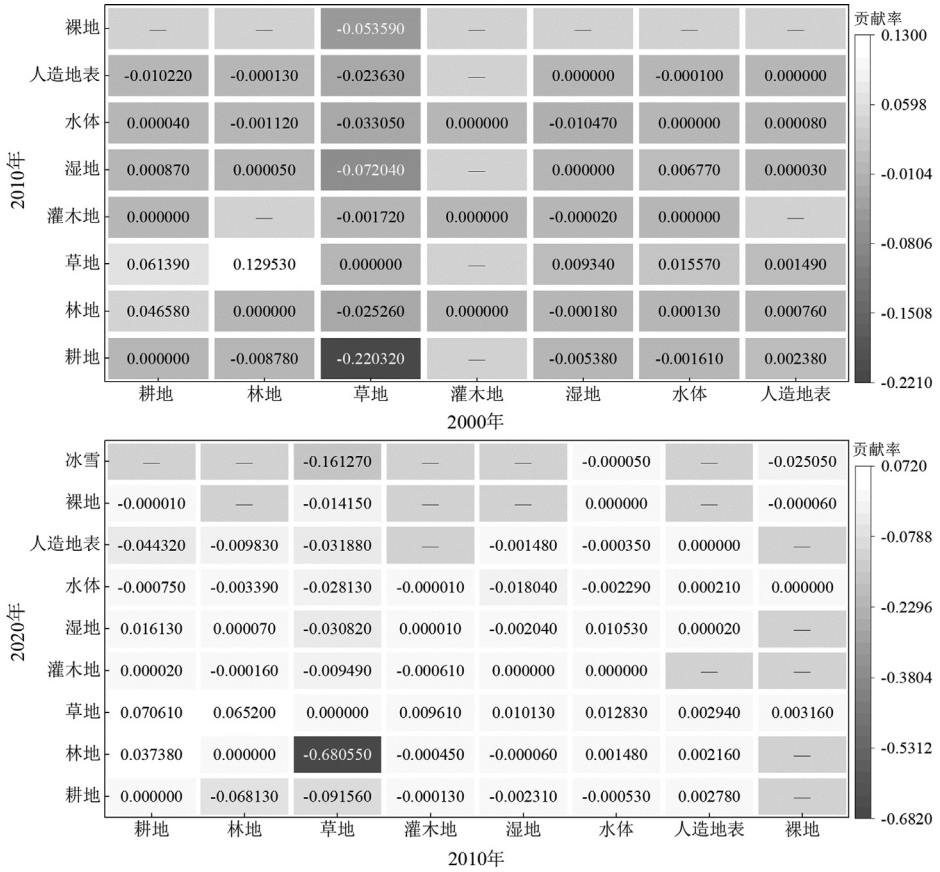



图 4 土地利用转换对生境质量的贡献度

Fig.4 The contribution degree of land use conversion to habitat quality

2.4.2 交互探测 从交互探测结果可以看出(图 5(b)),任意两因子的交互作用对研究区生境质量的影响均大于单个因子,交互关系表现为非线性增强或双因子增强,其中海拔和年均气温与其他因子的交互作用较强,解释力均在 40%以上,特别是海拔∩GDP(0.507)、海拔∩年均蒸发量(0.504)、海拔∩人口数量(0.502)、海拔∩年均降水(0.558)、年均温度∩年均降水(0.575)解释力超过 50%,表明海拔引起的水热梯度变化和区域经济发展水平的协同作用对甘南州生境质量产生了关键性影响;GDP 和人口数量与其他因子的交互作用同样表现为增强效应,解释力均在 25%以上,其余因子间交互作用相对较弱.总体来说,海拔、年均温度、年均降水、年均蒸发量、GDP、人口数量是影响甘南州生境质量空间分布的主要因素,但自然环境因素(海拔、年均降水、年均温度和年均蒸发量)起主导作用.

2.4.3 生境质量与主要影响因子的空间响应关系 基于地理探测器结果和多重共线性诊断(排除 VIF>7.5 的因子),采用 GWR 模型分析了主要影响因素(海拔、年均蒸发量、年均温度、年均降水量、GDP 和人口数量)对平均生境质量变化的空间效应,模拟结果表现较好,拟合优度($R^2$)为 0.87,高于 OLS 模型($R^2$=0.75).从图 6 可以看出,年均温度(负值影响比例 93.59%,正值影响比例 6.41%)和年均降水量(负值影响比例 18.82%,正值影响比例 81.18%)对生境质量具有正负双向效应,且影响区域较为分散,反应了研究区水热组合的空间差异;GDP 和人口数量对生境质量主要表现为负向效应,负值影响比例分别达 69.00%和 69.07%,回归系数在研究区中西部(夏河县和碌曲县北部)较高,这主要源于人类活动强度与生态系统脆弱性的空间耦合效应;生境质量与海拔呈显著正相关($P$<0.01),其值随海拔的升高而明显增大(图 7),回归系数均值的绝对值高于其他因子,具有主导作用,低海拔(<2500m)(如舟曲县)和中海拔

(2500~3200m)区域(如合作市、临潭县),耕地、建设用地和路网广泛分布,生境质量相对较低(均值为0.125),高海拔(>3200m)区域(如玛曲县)降水丰沛,以高寒草原为主,物种多样性丰富,植被覆盖度较高[30],生境质量相对较好,均值为 0.745(图 7).整体上,各驱动因子的影响在生境质量空间变化中表现出显著差异,说明生境质量空间分布上的差异性受多种因素影响.因此,结合海拔梯度与主要影响因素,制定精准的生态分区管控策略对生境质量的可持续发展至关重要.

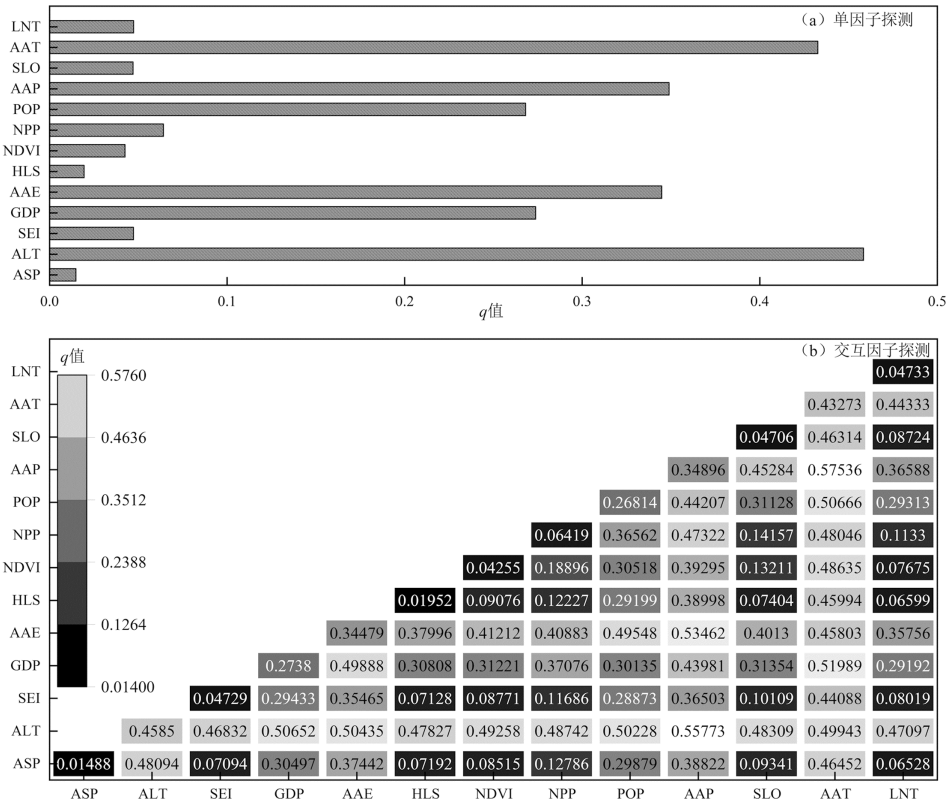



图 5　甘南州生境质量驱动因子探测结果

Fig.5　Results of the detection of driving factors of habitat quality in Gannan Tibetan Autonomous Prefecture

LNL:夜间灯光;AAT:年均温度;SLO:坡度;AAP:年均降水;POP:人口数量;NPP:净初级生产力;NDVI:归一化植被指数;HLS:山体阴影;AAE:年均蒸发量;GDP:人均国内生产总值;SEI:土壤侵蚀强度;ALT:高程;ASP:坡向

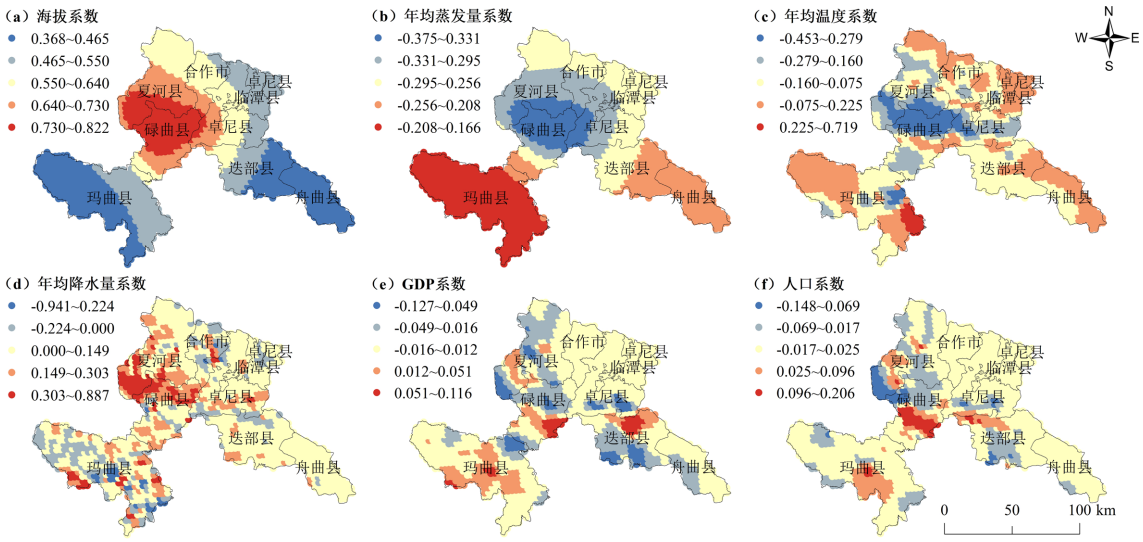



图 6　影响生境质量主要因素的 GWR 模型回归系数的空间异质性

Fig.6　The spatial heterogeneity of the regression coefficients of the GWR model for the main factors affecting habitat quality

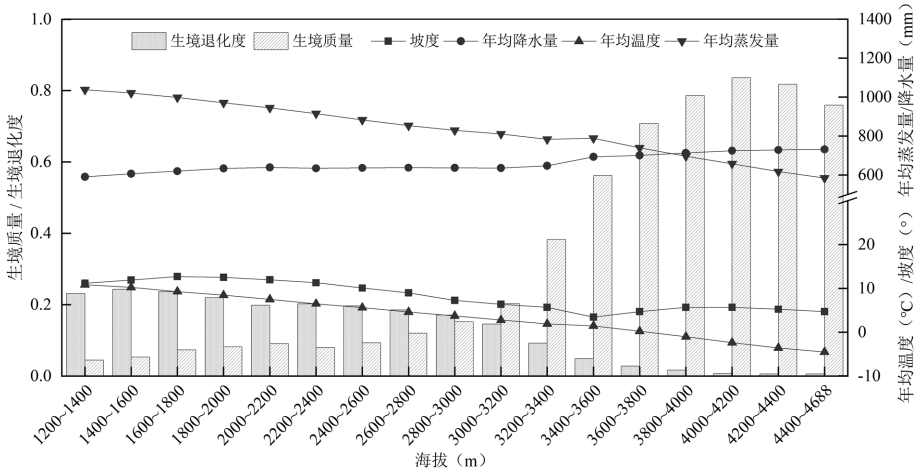



图 7 不同海拔梯度生境质量与生态环境因子的响应关系

Fig.7 The response relationship between habitat quality and ecological environment factors at different altitude gradients

## 3 讨论

### 3.1 甘南州生境质量特征及变化

甘南州作为青藏高原东北缘的核心生态节点和黄河长江上游重要的生态屏障,其生境的优劣直接关系到区域的生态平衡和黄河流域的高质量发展.本研究结果显示,2000~2020 年甘南州生境质量持续下降,高等级生境正向低等级生境转变,这一变化趋势与周杰等[31]在本区域的研究结果基本一致.草地和林地作为高生境质量区域的核心组成部分,快速的城镇化进程使其大量被基础设施和住宅等建设用地所侵占[32],同时,一些地区不合理的人类活动(过度放牧、毁林开垦、水电和矿产资源的过度开发等)致使草地大面积退化,这些都导致了低生境质量面积的增加,此现象与郝子萱[33]在黄河流域山西段的研究结果较为相似.此外,本研究还发现生境质量冷点区域主要分布于西北-东南沿线的城镇周边,且呈扩展趋势,热点区域集中分布在研究区西南部的玛曲县和碌曲县,这种不平衡的空间分布主要是由人口数量增加和生计方式变化引起的林地破碎化、草地斑驳化和荒漠化所致[34].事实上,研究区先后实施了退耕还林还草、山水林田湖草沙一体化保护修复工程,生物多样性明显提升,物种丰富度显著提高(增加 6 种/$m^2$),土壤有机质有效增加(提高 132g/$m^2$) [35],林地和草地虽有所恢复,但农牧争地矛盾依旧突出[36],建设用地和耕地依然大幅增加,且基本由草地和林地转移,而西南部较高的生境质量得益于黄河流域生态保护和高质量发展等一系列政策的实施,玛曲县、碌曲县被纳入黄河上游重点生态修复区,使水环境得以治理(土壤含水率提高 17%;玛曲河岸带地下水位上升 0.8~1.5m)、植被有效恢复(草层平均高度提高 9.6cm)、植被覆盖度稳定提高(提高 32%)[37].综上分析,在全球气候变暖的背景下,应严格管控建设用地扩张,严格落实耕地用途管制制度,重点关注研究区林地和草地面积的变化,积极推进复植、复绿、复湿等生态保护修复工程,切实提高生境质量的整体性和连通性,实现从“生态洼地”到“韧性廊道”的功能升级.

### 3.2 生境质量与驱动因子的响应及空间分异归因

地理探测器和 GWR 结果显示,人口数量和 GDP 是影响甘南州生境质量解释力较强的社会经济因素,与生境质量在大部分区域呈负相关,这与众多学者[38-39]在不同区域的研究结果较为一致,说明长期频繁的人类活动对研究区生境质量造成了显著的负面影响.吴聘奇等[40]认为,区域生境质量受自然环境因素和社会经济因素的复合影响,本研究也同样发现,高程与其他因子的交互作用是影响生境质量空间分异的主导因素,在不同海拔梯度,生境质量具有明显差异($P$<0.05),3200m 以下的区域(舟曲县、迭部县、临潭县、合作市等)生境质量较低且退化度较强,3200m 以上的区域(玛曲县、碌曲县),生境质量较高且退化度较低.究其原因,低海拔(<2500m)和中海拔(2500~3200m)区域多为河谷和盆地,广泛分布有大量耕地(河谷地带耕地面积占比达 28%[41]),且呈扩张趋势(如舟曲县耕地扩张速率达 800$hm^2$/年),同时,此区域路网密集(道路密度达 1.8km /

$km^2$[42]),建设用地蔓延(如合作市、临潭县城镇建成区年均扩张 12%),加之该地带降水量较少(590~635mm),蒸发量偏大(810~1037mm),尤其是气候变化引起的“暖干化”现象在正进一步加剧[43],使植被破碎化严重,连通性较差,生态较为脆弱,生境质量相对较差,朱紫怡等[44]在云南省生境质量研究中也得到了类似结果;3200m 以上的区域生境较为湿润、人类活动干扰较少(人口密度为 2.3 人/$km^2$),生物多样性较为丰富[45],主要以草原、湿地和高寒草甸为主,且该区域大部分面积为黄河上游核心保护区,相关政策(草原禁牧和草畜平衡政策、生态补偿政策等)的实施,限制了过度放牧和过度开发,促进了生态恢复,生境质量较高,Chen 等[46]在云南昭通生境质量驱动力研究中也同样发现,高海拔区域由于降水丰沛、人类活动干扰较弱,植被覆盖度较高,中高质量生境多分布于中高海拔梯度,范宇阳等[47]的研究也同样认为实施禁牧休牧、退耕还林等生态系统恢复和保护措施有效改善了人类活动等驱动因素对赛罕乌拉国家级自然保护区生境质量的负面影响.需要注意的是,高海拔地带虽生境质量较高,但其对气候变化更为敏感,全球气候变暖引发的冻土消融、湿地萎缩和草甸退化现象已在玛曲县凸现[48],这致使草原和高寒草甸连续性下降,多以斑块分布,生境以点状退化.总体来看,甘南州生境退化是高强度人类活动干扰和气候敏感脆弱性叠加的结果,在未来生态保护中,应综合考虑不同驱动因素特点,采取差异化的多元调控策略,如在低海拔地区建立“生态修复-产业适配-社区共治”的三位一体治理模式,同时关注高海拔区域气候变化对生境质量的影响,在气候变化阈值前构建更具韧性的保护体系,通过精细化调控人地关系和应对气候变化的策略,推动生境质量从“被动防御”向“主动增值”转型,从而实现经济发展与生态环境保护的和谐共生.

### 3.3　不足与展望

InVEST 模型在设定部分关键参数(如威胁源的可达性)时,当前仍需依赖既有研究成果和专家经验进行赋值,这种主管赋值方式可能会对评价结果带来一定程度的不确定性.为探究其影响程度,本研究对比分析了威胁源完全可达(可达性参数赋值为 1)和不考虑威胁源可达性因素两种情况下的生境质量和生境退化度.结果显示,尽管两种情况下生境质量和生境退化度存在一定的波动,但统计检验,生境质量 ($P$=0.902,$\alpha$<0.05) 和生境退化度 ($P$=0.925,$\alpha$<0.05)的差异均为达到统计学显著水平,表明本研究结果较好的反映了甘南州生境质量和生境退化度的时空变化.此外,由于土地利用数据在时间上的局限性,本研究以 5a 尺度分析了生境质量时空特征及驱动因素,未能及时反映生境质量在更小时间尺度上的变化,在后期研究中可提高时间精度,如以月为单位,探讨生境质量的季节性变化;同时在驱动因子选择上,人类活动与政策保护的量化方法有待丰富,需引入更多的数据和指标模型深化对生态环境变化机制的解析.

## 4　结论

4.1　2000~2020 年,甘南州生境质量整体呈退化趋势,由 2000 年的 0.481 下降至 2020 年的 0.450,年均下降率为 0.0016$a^{-1}$,空间相对稳定,呈西南高,西北-东南低的分布特征,热点区域集中分布在海拔较高的玛曲县和碌曲县,但分布较为破碎,且呈持续萎缩趋势,20a 间累计较少 $1.11\times10^4km^2$,冷点区域集中在城镇周边以及路网密集区域,以建设用地和耕地为主,并呈扩张趋势,20a 间累计增加 $1.46\times10^4km^2$,增幅为 17.05%.

4.2　2000~2020年,甘南州土地利用类型相互转换对生境质量产生了消极影响,生境质量指数累计下降0.031,生态用地向生活生产用地、草地向林地是导致生境质量下降的主要转换类型,且其贡献率在持续增高;林地、耕地向草地以及耕地向林地是促使生境质量改善的主要转换类型,但其贡献率有所下降.

4.3　甘南州生境质量在时空维度上的分异特征,是自然环境因素与社会经济条件系统驱动的结果,各驱动因素对生境质量的影响存在显著差异,其中高程、年均温度、年均降水量、年均蒸发量等自然指标,以及 GDP、人口数量等社会经济变量,构成了生境质量分异的核心驱动要素;各驱动因子间呈非线性增强或双因子增强,其中高程与其余因子的交互作用最强,在塑造研究区域生境质量空间分布格局中发挥着主导性作用.

4.4　在主要驱动因子中,年均温度、年均蒸发量、GDP 和人口数量对生境质量主要产生负向作用,但高程和降水对生境质量正向效应显著,3200m 以下

区域,生境质量较小且退化较为严重,3200m 以上区域,降水丰沛、生境质量较高,但此区域对气候变化较为敏感,草地连续性不高,生境以点状退化.

**参考文献:**


[1] 陈兵兵,盖迎春,王生棠,等.基于改进遥感生态指数的干旱区生态质量评价——以石羊河流域为例 [J]. 遥感技术与应用, 2025,40(2):472-484.
Chen B B, Gai Y C, Wang S T, et al. Evaluation of ecological in arid region based on upgraded remote sensing ecological index: Taking Shiyang River Basin as an example [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2025,40(2):472-484.

[2] 许 静,刘 慧.甘肃省生态系统服务权衡协同关系评估与预测 [J]. 中国环境科学, 2024,44(4):1863-1874.
Xu J, Liu H. Assessment and prediction of ecosystem services trade-offs and synergies relationships in Gansu Provice [J]. China Environment Science, 2024,44(4):1863-1874.

[3] 朱梅涛,邢莉圆,牛学瑶,等.县域尺度下首都经济圈生境质量时空变化与影响因素分析 [J]. 现代地质, 2025,39(2):396-409.
Zhu M T, Xing L Y, Niu X Y, et al. Analysis of spatial and temporal variations in habitat quality and influencing factors in the capital economic zone at the county scal [J]. Geoscience, 2025,39(2):396-409.

[4] 张家豪,魏菲菲,李拉拉,等.黑河流域土地利用变化特征及其对生境质量的影响 [J]. 热带农业工程, 2024,48(2):6-13.
Zhang J H, Wei F F, Li L L, et al. Characteristics of land use change and the impacts on habitat quality in Heihe River Basin [J]. Tropical Agricultural Engineering, 2024,48(2):6-13.

[5] 孙晓雨,杨金明,张家豪,等.五台山风景名胜区土地利用变化及其对生境质量的影响 [J]. 自然保护地, 2024,4(2):124-140.
Sun X Y, Yang J M, Zhang J H, et al. Impact of land use change on habitat quality in Mount Wutai Scenic Area [J]. Natural Protected Areas, 2024,4(2):124-140.

[6] Zhang X B, Liu Y N, Yin F, et al. Multi-scenario simulation of land use change and its impact on ecosystem services in the northeastern edge of the Qinghai-Xizang Plateau, China [J]. Journal of Arid Land, 2025,17(2):145-166.

[7] Zhou J L, Sun Q, Qi W, et al. Quantifying and mapping the effects of ecosystem services on agricultural competitiveness: A case study in Shandong Province, China [J]. Chinese Geographical Science, 2025, 35(2):326-342.

[8] 吴雨桐,於 冉,余祺琪,等.皖江流域生境质量评价及多情景优化研究 [J]. 生态环境学报, 2025,34(6):961-973.
Wu Y T, Yu R, Yu Q Q, et al. Evaluation and multi-scenario optimization of habitat quality in the basin of Yangtze River in Anhui Province [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2025,34(6):961-973.

[9] 王 洋,冯卓亚,许 丽,等.塔里木河流域生境质量与土地利用变化响应及驱动力 [J]. 干旱区研究, 2024,41(12):2132-2142.
Wang Y, Feng Z Y, Xu L, et al. Response and influencing factors of habitat quality and land use change in the Tarim River Basin [J]. Arid Zone Research, 2024,41(12):2132 -2142.

[10] 苏军德,赵晓闯,李国霞,等.祁连山国家自然保护区生境质量时空特征及驱动因素分析 [J]. 中国环境科学, 2024,44(5):2595-2605.
Su J D, Zhao X J, Li G X, et al. Spatial and temporal characteristics and driving factors of habitat quality in Qilian Mountains National Nature Reserve [J]. China Environment Science, 2024,44(5):2595-2605.

[11] Torn K, Herkül K, Martin G, et al. Assessment of quality of three marine benthic habitat types in northern Baltic Sea [J]. Ecological indicators, 2017,73:772-783.

[12] 郑启航,徐光来,刘永婷,等.基于 InVEST 和 MGWR 模型的安徽省生境质量评估及驱动 [J]. 水土保持研究, 2024,31(3):373-382.
Zheng Q H, Xu G L, Liu Y T, et al. Assessment and driving of habitat quality in Anhui Province based on InVEST and MGWR Model [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024,31(3):373-382.

[13] Özgenç E K, Uzun O. Impacts of land use/land cover and climate change on landscape sensitivity in Tunca River sub-basin: Use in spatial planning and sectoral decision processes [J]. Journal of Environmental Management, 2024,363,doi:10.1016/j.jenvman.2024.121372.

[14] 刘志春,曹文侠,王正文,等.2005~2020 年甘肃省甘南州水源涵养功能时空变化及其驱动因素 [J]. 水土保持通报, 2024,44(3):231-240.
Liu Z C, Cao W X, Wang Z W, et al. Spatiotemporal variation of water conservation function and its driving factors in Gannan Prefecture of Gansu Province during 2005~2020 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024,44(3):231-240.

[15] 刘会芳.基于生态系统服务价值和牧户受偿意愿的草地生态补奖政策优化研究 [D]. 兰州:兰州大学, 2024.
Liu H F. Optimization research on grassland ecological compensation policy based on ecosystem service value and herders willingness to accept [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2024.

[16] 高泽宇.黄河流域甘肃段生态环境质量研究 [J]. 合作经济与科技, 2023,(8):22-24.
Gao Z Y. Research on the ecological environment quality of the Gansu Section of the Yellow River Basin [J]. Cooperative Economy and Science & Technology, 2023,(8):22-24.

[17] 刘旻霞,张娅娅,李全弟,等.甘南高寒草甸植物群落物种多度分布特征 [J]. 中国环境科学, 2021,41(3):1405-1414.
Liu M X, Zhang Y Y, Li Q D, et al. Species abundance distribution characteristics of alpine meadow plant community in Gannan [J]. China Environmental Science, 2021,41(3):1405-1414.

[18] Chen F L, Kang N, Wang S J, et al. Response of precipitation isotopes and water vapor sources to regional climate change on the Gannan Plateau, China [J]. Journal of Arid Land, 2025,17(4):440-456.

[19] Zhang X B, Liu Y N, Yin J F, et al. Multi-scenario simulation of land use change and its impact on ecosystem services in the northeastern edge of the Qinghai-Xizang Plateau, China [J]. Journal of Arid Land, 2025,17(2):145-166.

[20] 郭彬斌,刘瑜馨.基于 ANUSPLIN 和 InVEST 模型的湘江流域水源涵养时空动态研究 [J]. 人民珠江, 2025,46(7):74-85.
Guo B B, Liu Y X. Spatial and temporal dynamics of water conservation in Xiangjiang River Basin based on ANUSPLIN and InVEST Model [J]. Pearl River, 2025,46(7):74-85.

[21] 李帆帆,李 巍,王录仓,等.甘南黄河水源补给区生态系统服务供需

关系时空变化研究 [J/OL]. 生态与农村环境学报, 1-18[2025-04-30].https://doi.org/10.19741/j.issn.1673-4831.2024.1032.
Li F F, Li W, Wang L C, et al. Spatiotemporal changes of supply and demand relationships of ecosystem services in the Yellow River water supply area of Gannan [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 1-18[2025-04-30].https://doi.org/10.19741/j.issn.1673-4831.2024.1032.

[22] 张　薇,朱　睿,杨华庆,等.基于 PLUS-InVEST 模型的黄河水源涵养区碳储量时空演变分析及模拟预测 [J]. 高原气象, 2025,44(2):362-377.
Zhang W, Zhu R, Yang Q H, et al. Spatio-temporal evolution and prediction of carbon storage in the water conservation area of Yellow River Basin based on the PLUS-InVEST Model [J]. Plateau Meteorology, 2025,44(2):362-377.

[23] 张露尹,朱大明,左小清,等.基于 InVEST 模型的多情景下滇中城市群生境质量时空演变特征及预测 [J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2024,60(4):547-555.
Zhang L Y, Zhu D M, Zuo X Q, et al. Spatiotemporal evolution characteristics and prediction of habitat quality in the Central Yunnan Urban Agglomeration under multiple scenarios based on the InVEST model [J]. Journal of Lanzhou University(Natural Sciences), 2024, 60(4):547-555.

[24] 朱炳淑,樊江文,张海燕,等.三江源国家公园黄河源园区高寒草地健康评价 [J]. 草业学报, 2025,34(7):13-27.
Zhu B S, Fan J W, Zhang H Y, et al. Grassland health assessment of alpine grassland in the Yellow River Source Park of Theee-Rivers Headwaters National Park [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2025,34(7):13-27.

[25] 严　莉,曹广超,康利刚,等.基于 InVEST 模型的共和县生境质量时空变化及驱动因素 [J]. 干旱区研究, 2024,41(2):314-325.
Yan L, Cao G C, Kang L G, et al. Analysis of spatial and temporal changes in habitat quality and driving factors in Gonghe County using the InVEST model [J]. Arid Zone Research, 2024,41(2):314-325.

[26] 战卫彤,吴一帆,郑伟伟,等.黄河流域多时空土地利用/景观格局变化对水质的影响:基于地理加权回归模型的实证 [J/OL]. 环境科学, 1-20[2025-04-30]. https://doi.org/ 10.13227/j.hjkx.202409146.
Zhan W T, Wu Y F, Zheng W W, et al. Impacts of changes of multi-temporal land use/landscape patterns on water quality in the Yellow River Basin: An empirical study based on Geographically Weighted Regression modeling [J/OL]. Environmental Science, 1-20[2025-04-30]. https://doi.org/ 10.13227/j.hjkx.202409146.

[27] 李晓榕,陈强强.全生命周期视角下甘南黄河水源补给区畜牧业碳足迹估算及时空格局分析 [J]. 草业学报, 2024,33(9):227-241.
Li X R, Chen Q Q. A full life cycle carbon footprint calculation and analysis of spatial-temporal pattern for livestock industries in the Yellow River water supply area of Gannan [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2024,33(9):227-241.

[28] 殷　菲,白　冰,黄鹏程,等.气候和人类活动对黄河干流甘肃段 NDVI 变化的影响 [J]. 干旱气象, 2024,42(6):934-943.
Yin F, Bai B, Huang P C, et al. Impact of climate and human activities on NDVI changes in Gansu section of the Yellow River main stream [J]. Journal of Arid Meteorology, 2024,42(6):934-943.

[29] 张志浩,何宝忠,宋雅宁,等.基于 SD-PLUS-InVEST 的新疆土地利用及生境质量多情景分析 [J]. 环境科学与技术, 2025,48(3):10-22.
Zhang Z H, He B Z, Song Y N, et al. Multi-scenario analysis of land-use and habitat quality in Xinjiang based on SD-PLUS-InVEST [J]. Environmental Science & Technology, 2025,48(3):10-22.

[30] 赵晓闾,王　建,苏军德.自然保护区对珍稀濒危野生植物保护效率评价 [J]. 中国环境科学, 2023,43(10):5412-5421.
Zhao X J, Wang J, Su J D. Evaluation on the conservation efficiency of Natural Reserves for rare and endangered wild plants [J]. China Environmental Science, 2023,43(10):5412-5421.

[31] 周　杰,杨　洁,张文柳.甘南州生态系统服务时空变化及权衡协同关系 [J]. 环境科学, 2025,46(4):2398-2409.
Zhou J, Yang J, Zhang W L. Spatiotemporal variation and trade-off synergistic relationship of ecosystem service in Gannan prefecture [J]. Environmental Science, 2025,46(4):2398-2409.

[32] 田　明,田一聪,张文忠.青藏高原县域工业化与城镇化及转移支付的可持续发展效应 [J]. 地理学报, 2025,80(4):1068-1088.
Tian M, Tian Y C, Zhang W Z. Sustainable development effects of county-level industrialization, urbanization, and transfer payments in the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Acta Geographica Sinica, 2025,80(4):1068-1088.

[33] 郝子萱,马佳凯,王　傲,等.基于 InVEST-MGWR 模型的黄河流域山西段生境质量变化及其影响因素 [J]. 应用生态学报, 2025,36(5):1478-1486.
Hao Z X, Ma J K, Wang A, et al. Changes of habitat quality and its influencing factor in the Shanxi Sention of the Yellow River Basin based on InVEST-MGWR model [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2025,36(5):1478-1486.

[34] 程　进.我国生态脆弱民族地区空间冲突及治理机制研究 [D]. 上海:华东师范大学, 2013.
Cheng J. Spatial conflict and governance mechanism in ethnic areas with fragile ecological in China: The case of Gannan Tibetan Autonomous prefecture in Gansu Province [D]. Shanghai: East China Normal University, 2013.

[35] 李新文,陈　耀,陈强强,等.草原建设工程项目效益评价实证研究——以甘南州天然草原恢复与建设项目为例 [J]. 草业科学, 2014,31(1):193-199.
Li X W, Chen Y, Chen Q Q, et al. Empirical study on comprehensive benefit of recovery and construction project of grassland —— A case study of Gannan Tibet Municipality [J]. Pratacultural Science, 2014, 31(1):193-199.

[36] 王向雯,陈强强,王　佳,等.前两轮草原生态补奖政策实施绩效比对与优化路径 [J]. 草地学报, 2025,33(7):2345-2356.
Wang X W, Chen Q Q, Wang J, et al. Comparison of the implementation performance of the first two rounds of grassland ecological compensation policy and optimization path [J]. Acta Agrestia Sinica, 2025,33(7):2345-2356.

[37] 朱　丽,刘冬皓,谈嫣蓉,等.黄河源区(玛曲)近 20 年生态环境质量动态评价 [J]. 西北林学院学报, 2025,40(1):209-217.
Zhu L, Liu D H, Tang Y R, et al. Dynamic assessment of ecological and environment quality in the source region of the Yellow River (Maqu) in recent 20 years [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2025,40(1):209-217.

[38] Wang X, Ma L, Lu H, et al. Spatiotemporal influence of driving

factors on water conservation in underdeveloped plateau regions: a case in the Yellow River Basin of Sichuan, China [J]. Journal of Mountain Science, 2025,22(4):1289−1305.

[39] 张 娟,赵润江,雷金睿,等.基于 InVEST 模型的海口市 2000~2020 年生境质量时空演变分析 [J]. 浙江农林大学学报, 2025,42(2):383−392.
Zhang J, Zhao R J, Lei J R, et al. Spatio−temporal evolution of habitat quality in Haikou from 2000 to 2020 based on InVEST model [J]. Journal of Zhejiang A & F University, 2025,42(2):383−392.

[40] 吴聘奇,沈 越,佘茵茵,等.闽江流域生境质量演变驱动机制及多情景模拟优化 [J]. 环境科学,46(11):7156−7171.
Wu P Q, Shen Y, Yu Y Y, et al. Driving mechanisms of habitat quality evolution and multi−scenario simulation optimization of habitat quality in Minjiang River Basin [J]. Environmental Science, 46(11):7156−7171.

[41] 贾艳红,晏忠凤.市域尺度下甘肃省耕地变化的区域差异研究 [J]. 测绘与空间地理信息, 2021,44(8):7−11.
Jia Y H, Yan Z F. Study on the regional differences of cultivated land change in Gansu Province under the municipal scale [J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2021,44(8):7−11.

[42] 蒋经民.道路交通发展的区域社会−生态效应评估——基于甘肃省的实证分析 [J]. 甘肃科技, 2024,40(3):65−70.
Jiang J M. Evaluation of the Regional Socio−ecological Effects of road traffic development: An empirical analysis based on Gansu Province [J]. Gansu Science and Technology, 2024,40(3):65−70.

[43] 王志伟.近 30 年甘南州气候变化特征分析 [J]. 河南科技, 2024,51(20):104−107.
Wang Z W. Analysis of climate changes in Gannan prefecture, Gansu Province in the past 30 years [J]. Henan Science and Technology, 2024,51(20):104−107.

[44] 朱紫怡,彭双云,林之强,等.基于频率−幅度的云南省生境质量敏感区识别及其驱动机制 [J/OL]. 环境科学, 1−18[2025−06−19]. https://doi.org/10.13227/j.hjkx.202502212.
Zhu Z Y, Peng S Y, Lin Z Q, et al. Identification of habitat quality sensitive areas and their driving mechanisms in Yunnan Province based on frequency−amplitude sensitivity analusis [J/OL]. Environmental Science, 1−18[2025−06−19]. https://doi.org/10.13227/j.hjkx.202502212.

[45] 马 玥,王录仓.2000~2018年甘南州植被覆盖水平时空变化 [J]. 安徽农业科学, 2022,50(7):68−72,95.
Ma Y, Wang L C. Temporal and spatial changes of vegetation coverage in Gannan prefecture from 2000 to 2018 [J]. J. Anhui Agric. Sci, 2022,50(7):68−72,95.

[46] Chen H M, Liu F L, Yang B W, et al. Spatial−temporal evolution and driving factors of habitat quality based on different topographic gradients in Zhaotong City, Yunnan Province [J]. Journal of Resources and Ecology, 2025,16(2):306−325.

[47] 范宇阳,孟和达来,洪美静,等.赛罕乌拉国家级自然保护区生态系统服务时空格局及驱动因素分析 [J/OL]. 环境科学, 1−15[2025−06−19].https://doi.org/10.13227/j.hjkx. 202501159.
Fan Y Y, Meng H D L, Hong M J, et al. Spatiotemporal pattern and driving factors of the ecosystem servince in Saihanwula Nature Reserve [J/OL]. Environmental Science, 1−15[2025−06−19].https://doi.org/10.13227/j.hjkx.202501159.

[48] 陈梦佳,白 炜,张成铭,等.多年冻土区热喀斯特湖水—热—碳循环过程研究进展 [J]. 地球科学进展, 2025,40(1):82−98.
Chen M J, Bai W, Zhang C M, et al. Advances in the study of water, heat, and carbon cycling dynamics in thermokarst lakes of permafrost [J]. Advances in Earth Science, 2025,40(1):82−98.

**作者简介：**苏军德(1986−),男,甘肃武威人,教授,硕士,主要从事遥感生态学等方面的研究.发表论文 20 余篇.sujd2009@163.com.