

DOI: 10.5846/stxb202211183332

杨华, 徐勇, 王丽佳, 徐琳. 青藏高原人类活动强度时空变化与影响因素. 生态学报, 2023, 43(10): 3995-4009.

Yang H, Xu Y, Wang L J, Xu L. Spatio-temporal variation of human activity intensity and its driving factors on the Qinghai-Tibet Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(10): 3995-4009.

## 青藏高原人类活动强度时空变化与影响因素

杨 华<sup>1,2</sup>, 徐 勇<sup>1,2,\*</sup>, 王丽佳<sup>1,2</sup>, 徐 琳<sup>1,2</sup>

1 中国科学院地理科学与资源研究所 中国科学院区域可持续发展分析与模拟重点实验室, 北京 100101

2 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要:**科学评估人类活动强度对于统筹协调青藏高原生态保护与人类活动具有重要意义。基于多期土地利用现状调查数据和陆地表层人类活动强度算法, 测算和分析了青藏高原 1984 年、1997 年、2008 年和 2018 年的人类活动强度及其时空变化特征, 使用地理探测器定量解析了影响青藏高原人类活动强度空间分异的驱动因素。结果表明: (1) 1984—2018 年青藏高原人类活动强度总体处于低水平阶段, 大致以 2008 年为节点, 前期缓慢下降, 后期快速上升, 1984 年的人类活动强度为 1.44%, 2018 年上升到 1.70%; (2) 西藏“一江两河”地区(雅鲁藏布江、拉萨河和年楚河)和青海河湟谷地的人类活动强度最高, 沿日喀则-拉萨-那曲-玉树-果洛-西宁形成条带状的相对高值分布区, 川藏高山峡谷区、藏北-青南高原区和帕米尔山区的人类活动强度最低; (3) 人类活动强度空间分异的主要因素为人口密度、道路密度、经济规模、地表起伏度、城镇化水平、第一产业占比和区域发展导向, 且各因子间的交互作用解释力显著高于单因子, 表现为非线性增强和双因子增强。

**关键词:**人类活动强度; 建设用地当量; 地理探测器; 土地利用; 青藏高原

## Spatio-temporal variation of human activity intensity and its driving factors on the Qinghai-Tibet Plateau

YANG Hua<sup>1,2</sup>, XU Yong<sup>1,2,\*</sup>, WANG Lijia<sup>1,2</sup>, XU Lin<sup>1,2</sup>

1 Key Laboratory of Regional Sustainable Development Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** The human activity intensity is a comprehensive indicator that objectively reflects the impact of different human activities on the terrestrial surface and the extent of its effects. The scientific assessment for the human activity intensity has a pivotal role in coordinating regional ecological protection with human activities on the Qinghai-Tibet Plateau. However, the scale and intensity of human activities and its variation patterns on the Qinghai-Tibet Plateau are not yet clear. Therefore, there is an urgent need for quantitative study on the human activity intensity. Based on the multi-period land use survey data and the algorithm of human activity intensity of land surface, this study measured and analyzed the human activity intensity and its spatio-temporal variation characteristics on the Qinghai-Tibet Plateau in 1984, 1997, 2008, and 2018. Subsequently, the driving factors affecting the spatial variation of human activity intensity were detected using the Geographical detector model. This article obtains three conclusions: (1) the overall human activity intensity was generally at a low level on the Qinghai-Tibet Plateau from 1984 to 2018. The human activity intensity has experienced a slight decline from 1.44% in 1984 to 1.37% in 2008, while sharply rose to a high point and peaked to 1.70% in 2018. (2) The regions with the highest intensity of human activity included the Three River Basin in Tibet (Yarlung Zangbo River, Lhasa River,

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK0406)

收稿日期: 2022-11-18; 采用日期: 2023-00-00

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xuy@igsnrr.ac.cn

and Nyanchu River) and the Yellow River-Huangshui River Valley region in Qinghai, and a strip-like distribution area of relatively high intensity of human activity was being formed along the Rikaze-Lhasa-Nagqu-Yushu-Guoluo-Xining, while these regions were the lowest in the Alpine-gorge region of Sichuan and Tibet, the Northern Tibetan-Southern Qinghai Plateau, and the Pamir Mountains. (3) The geographical detection results showed that the main factors influencing the spatial differentiation of human activity intensity were population density, road density, economic scales, relief degree of land surface, urbanization rate, the proportion of primary industries, and regional development orientation, and the factors' explanatory after the interaction was significantly higher than that of single, showing the interaction types of nonlinear-enhance and bi-variable enhance. The conclusions of this study can provide a scientific support and basic reference material for government decisions on the construction of ecological security barrier and spatial governance of territorial space on the Qinghai-Tibet Plateau.

**Key Words:** human activity intensity; construction land equivalent; Geographical detector model; land use; Qinghai-Tibet Plateau

进入人类世以来,人类活动几乎在所有尺度上都对自然环境产生了巨大影响<sup>[1]</sup>。作为全球面积最大同时也是人类活动最早开始介入的高海拔地区<sup>[2]</sup>,青藏高原早在 4—16 万年前就已出现人类活动,大规模的农牧业活动也至少存在了 3500 年<sup>[3-4]</sup>,特别是进入 21 世纪以来,人类活动扩张对青藏高原生态环境的影响日益增强<sup>[5]</sup>。青藏高原的人类活动在长期演化和适应过程中形成了鲜明的地域特征,其与高原生态环境的交互作用也显著强于其他地区。因此,量化和解析青藏高原人类活动的规模和强度及其生态环境效应也一直是学术界关注的热点和难点问题<sup>[6-9]</sup>。人类活动强度作为一个客观反映不同人类活动对陆地表层施加的影响及其作用程度的综合性指标,是研究区域生态环境变化及其效应、生态系统保护修复治理、社会经济可持续发展的前提和基础,也是青藏高原推进生态安全屏障建设和区域高质量发展的重要环节,科学评估人类活动强度及其时空变化特征对于统筹协调区域生态保护与人类活动具有重要意义。

人类活动强度是表达人类社会经济活动对自然状态下的区域产生影响的综合指标<sup>[10]</sup>,其测算方法大致可分为两类:多因素综合评价法和基于土地利用类型的评价方法<sup>[11]</sup>。人类足迹指数法是最具代表性的人类活动强度多因素综合评价法<sup>[12-15]</sup>,主要选取人造地表、人口密度、夜间灯光、耕地、牧场、道路、铁路、通航水道和电力基础设施等多个变量<sup>[16-17]</sup>,预先设定指标得分框架,或采用专家打分法和熵值法等确定因素权重<sup>[18-19]</sup>,最后加权求和得到人类活动强度指数。基于土地利用类型的评价方法从人类活动的承载主体出发,根据不同土地利用类型对应人类活动的作用力大小来反映人类活动对陆地表层的影响强度,主要有陆地表层人类活动强度测算方法<sup>[20-23]</sup>和人类扰动强度指数法等<sup>[24-25]</sup>。综合来看,基于权重的多因素综合评价法具有明确的空间指向性等优点,但指标选取和权重的确定存在主观性,同时输入指标可能存在重叠和共线性进而导致测算结果偏误。基于土地利用类型的测算方法物理意义更为明确,同时具有时间上和空间上的可比性。已有研究表明,基于土地利用类型测算的人类活动强度与人口密度具有高度的相关性,测算结果的准确性较高<sup>[20-21]</sup>。

人类活动是影响青藏高原生态安全的关键因素已成为学术界的共识<sup>[26-27]</sup>,但青藏高原人类活动的规模、强度及其时空演变格局等还较为模糊,定量测算青藏高原人类活动强度的相关研究成果较少。Li 等<sup>[7]</sup>综合评价了土地利用、人口密度、道路密度和放牧密度四项指标,在县级单元和公里格网两个空间尺度定量测算了青藏高原 1990、2000 和 2010 年的人类活动强度,发现青藏高原人类活动强度总体较低,东部、东南部和中部地区的人类活动强度较高,20 年间人类活动强度平均值增加 28.43%;Sun 等<sup>[8]</sup>加权求和了夜间灯光、人口密度、经济密度、耕地比重、到道路距离、到城镇距离、放牧强度和植被指数等评价指标,在栅格单元上定量测度了青藏高原 2000、2010 和 2015 年的人类活动强度,发现 15 年内青藏高原人类活动强度平均增加 4%,高值区集中在中东部地区;Li 等<sup>[14]</sup>沿用 Sanderson 等<sup>[12-13]</sup>提出的人类足迹测算方法测度了西藏自治区的人类足迹

指数,发现 1990—2010 年间人类足迹指数增加了 32.35%;此外,一些学者也从人口、土地利用、夜间灯光、放牧利用、道路、植被、旅游和污染物排放等要素出发,研制了栅格单元的青藏高原人类活动强度时空数据集,选用指标不断丰富,研究内容逐渐深化<sup>[28-30]</sup>。

综合来看,针对青藏高原人类活动强度的定量研究还不足,研究方法以多因素综合评价法为主,指标选取和权重确定的主观性和不一致等也导致研究结果难以相互比较和参考,特别是对青藏高原人类活动强度空间分异的影响因素的关注度不够。因此,本文基于 1984 年、1997 年、2008 年和 2018 年的土地利用调查数据,采用陆地表层人类活动强度测算方法<sup>[20]</sup>,构建适用于青藏高原的建设用地当量折算系数表,从县级单元和乡镇单元两个尺度测算和分析 34 年间青藏高原的人类活动强度及其时空变化特征,使用地理探测器模型从自然环境和社会经济两个方面解析人类活动强度空间分异的影响因素,研究结果可为青藏高原生态安全屏障建设和空间管治的政府决策提供科学依据。

## 1 研究区概况

青藏高原处于 73°30' E—104°20' E, 26°50' N—39°40' N, 涉及西藏自治区、青海省、四川省、新疆维吾尔自治区、甘肃省和云南省 6 个省(区),总面积约 258.23 万 km<sup>2</sup>,约占中国陆域国土总面积的 26.9%。青藏高原地势大致从西北羌塘高原向东南横断山区倾斜,主要的自然地理单元有帕米尔—昆仑山地、藏北—青南高原、冈底斯山—念青唐古拉山地、喜马拉雅山地、横断山区、柴达木盆地和祁连山地等,73% 的区域处于海拔 4000 m 以上(图 1)。空气稀薄,大气含氧量低,人类活动的高原反应明显。高原山地气候为主,气候总体干冷且空间差异极大,年平均气温仅为 1.37 °C,年平均降水量在 20—4500 mm 之间,太阳总辐射在 5400—8000 MJ m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup> 之间。冰川、湖泊和水系发育,是长江、黄河、澜沧江、怒江和雅鲁藏布江等中国主要水系的发源地,被誉为“中华水塔”。生态系统复杂多样,分布有高寒草原、高寒草甸、荒漠、森林和灌丛等生态系统,草原占比超过 60%。根据 2020 年第七次人口普查,青藏高原总人口约为 1313.4 万人,仅占中国总人口的 0.91%,城镇人口 624.79 万人,总体城镇化率 47.58%<sup>[31]</sup>。综合各省(区)和地级市(州)的第三次全国国土调查数据公

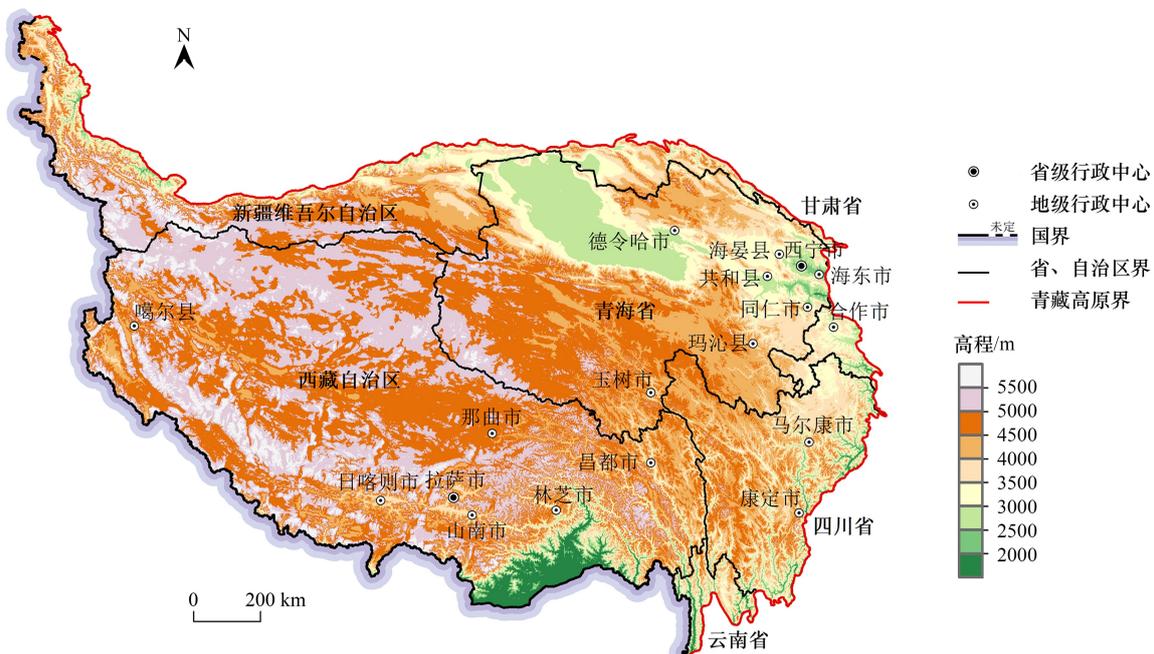


图 1 青藏高原地形高程

Fig.1 Topographic elevation of the Qinghai-Tibet Plateau

该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2022)4318 号的标准地图制作,底图无修改

报,2020年青藏高原耕地面积 20098.19 km<sup>2</sup>,种植园用地面积 3847.72 km<sup>2</sup>,草地面积 1490217.54 km<sup>2</sup>,城镇村及工矿用地面积 8554.71 km<sup>2</sup>,交通运输用地面积 5161.79 km<sup>2</sup>。

## 2 研究方法 with 数据

### 2.1 人类活动强度

青藏高原人类活动强度测算采用徐勇等提出的陆地表层人类活动强度算法 (Human activity intensity of land surface),即以建设用地当量为基本度量单位,以是否存在人工隔层,地表上下水分、养分、空气和热量是否正常交换为依据确定不同土地利用类型对应的建设用地当量折算系数,建设用地当量总和与区域总面积的比值为人类活动强度<sup>[20]</sup>。计算公式如下:

$$HAI = \frac{S_{CLE}}{S} \times 100\% \quad (1)$$

$$S_{CLE} = \sum_{i=1}^n (S L_i \cdot C I_i) \quad (2)$$

式中,HAI 表示人类活动强度; $S_{CLE}$  表示区域内建设用地当量面积; $S$  表示区域总面积; $S L_i$  表示第  $i$  种土地利用类型面积; $C I_i$  表示第  $i$  种土地利用类型的建设用地当量折算系数; $n$  表示土地利用类型数量。

合理界定不同用地类型的建设用地当量折算系数是测算人类活动强度的关键。在徐勇等<sup>[20]</sup>确定的建设用地当量通用折算系数基础上,根据第三次全国国土调查用地分类<sup>[32]</sup>构建全面反映青藏高原陆地表层人类活动的建设用地当量折算系数表(表 1),其中,新增光伏发电用地和风力发电用地的折算系数。光伏发电用地主要分为光伏板用地和附属设施用地,光伏板用地阻滞地表热量交换,建设用地当量折算系数设定为 0.2,附属设施用地按一般建设用地设定折算系数,但其规模相对很小,可纳入光伏板用地作为整体考虑。风力发电用地主要由风力发电机组和附属设施用地等构成,可用单台风力发电机组及其附属用地实际占地面积与用地面积的比值表示风力发电用地的建设用地当量折算系数。综合相关技术标准<sup>[33]</sup>、高精度卫星遥感影像和青海共和风力发电场(99°21'3.35" E,36°36'32.28" N)的实测数据,风力发电机组横向间距平均 500 m,纵向间距平均 1000 m,塔架底座平均占地 70 m<sup>2</sup>,机组箱式变压器平均占地 20 m<sup>2</sup>,附属道路平均宽度 5.5 m,测得风力发电用地的建设用地当量折算系数约为 0.004。风力发电用地的建设用地当量折算系数计算公式为:

$$C I_w = (S_\alpha + S_\beta + S_\gamma) / S \quad (3)$$

式中, $C I_w$  为风力发电用地的建设用地当量折算系数; $S_\alpha$  为杆塔底座实际占地面积; $S_\beta$  为机组箱式变压器实际占地面积; $S_\gamma$  为附属道路实际占地面积; $S$  为单台风力发电机组用地面积。

### 2.2 地理探测器

#### 2.2.1 基于最优参数的地理探测器模型

地理探测器模型是一种测度地理事物空间分异驱动力的统计方法,使用  $q$  值度量驱动因子的解释力大小<sup>[34]</sup>。地理探测器模型具有明确的物理意义、无线性假设、不受变量共线性影响和能够较处理好数值变量和类型变量等优点,被广泛应用于地理现象空间分异的影响因素探测<sup>[35-36]</sup>。然而,以往研究中较少考虑变量离散化方法和空间尺度效应的不同对地理探测结果产生的影响。基于最优参数的地理探测器模型是在传统模型的基础上,通过筛选解释力  $q$  值最高的离散化方案作为地理探测分析的前置条件,以提高地理事物空间分层异质性探测的整体分析能力<sup>[37]</sup>。基于 R 语言的“GD”扩展程序包筛选解释力  $q$  值最大的分类方法和分类级数作为地理探测的最优参数,使用因子探测功能度量影响因素对青藏高原人类活动强度空间分异的解释力大小,使用交互作用探测功能识别影响因素是否存在两两交互作用及其作用力大小。根据不同判别规则,交互作用类型可分为非线性减弱、单因子非线性减弱、双因子增强、独立和非线性增强 5 类,详见文献<sup>[34]</sup>。解释力  $q$  值的计算公式如下:

$$q = 1 - \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2 / N \sigma^2 \quad (4)$$

式中,  $q$  表示自变量解释了  $100 \times q\%$  的因变量,  $q \in [0, 1]$ ,  $q$  值越大表明自变量对因变量空间分异的解释力越强;  $L$  为自变量分层;  $N_h$  和  $N$  为层  $h$  和全区的单元数量;  $\sigma_h^2$  和  $\sigma^2$  分别为层  $h$  和全区的方差。

表 1 青藏高原不同土地利用类型的建设用地当量折算系数表

Table 1 Conversion index of construction land equivalent of different land use types on the Qinghai-Tibet Plateau

土地利用类型 Land use types		特征标志 Characteristic signs	折算系数 Conversion index
大类 First level class	小类 Second level class		
耕地 Cultivated land	水田、水浇地、旱地	表层自然覆被改变—种植 1 年生作物	0.2
种植园用地 Garden land	果园、茶园、橡胶园、其他园地	表层自然覆被改变—种植多年生作物	0.133
林地 Forest land	乔木林地、竹林地、红树林地、森林沼泽、灌木林地、灌丛沼泽	表层自然覆被未改变且未被利用	0
	其他林地	表层自然覆被改变—种植多年生作物	0.133
草地 Grassland	放牧利用天然草地、沼泽草地	表层自然覆被未改变但被利用	0.067
	人工牧草地	表层自然覆被改变—种植多年生作物	0.133
	其他草地	表层自然覆被未改变且未被利用	0
城镇村与工矿用地 Land for urban, rural, industrial, and mining activities	商业服务业用地(商业服务业设施用地、物流仓储用地)、住宅用地(城镇住宅用地、农村宅基地)、公共管理与公共服务用地(机关团体新闻出版用地、科教文卫用地、公用设施用地)、工矿用地(工业用地、采矿用地)、特殊用地	表层有人工隔层,水分、养分、空气和热量交换阻滞	1
	盐田	表层自然覆被改变,空气和热量交换阻滞	0.6
	公园与绿地	表层自然覆被未改变但被利用	0.067
交通运输用地 Land used for Transport	铁路用地、轨道交通用地、公路用地、城镇村道路用地、交通服务场站用地、农村道路、机场用地、港口码头用地、管道运输用地	表层有人工隔层,水分、养分、空气和热量交换阻滞	1
水域及水利设施用地 Land used for water and water conservancy facilities	河流水面、湖泊水面、水库水面、内陆滩涂、沼泽地、冰川及永久积雪	表层自然覆被未改变且未被利用	0
	水工建筑用地	表层有人工隔层,水分、养分、空气和热量交换阻滞	1
	坑塘水面、沟渠	表层自然覆被未改变但被利用	0.067
其他土地 Others	盐碱地、沙地、裸土地、裸岩石砾地	表层自然覆被未改变且未被利用	0
	设施农用地	表层有人工隔层,水分、养分、空气和热量交换阻滞	1
	田坎、空闲地	表层自然覆被未改变但被利用	0.067
	光伏发电用地	表层有人工隔层,热量交换阻滞	0.2
	风力发电用地	表层有人工隔层,水分、养分、空气和热量交换阻滞	0.004

### 2.2.2 影响因素选取

青藏高原人类活动强度的空间分异受自然环境和社会经济两方面的影响。以人类活动强度作为被解释变量,从自然环境和社会经济两方面共选取 12 个指标作为解释变量(表 2)。海拔高度( $X_1$ )反映垂直方向上人类进行生产生活活动的适宜性状况,已有研究表明海拔与大气含氧量和气温存在显著的负相关关系<sup>[38-39]</sup>,随着海拔的升高,人类活动的适宜性降低<sup>[40]</sup>;地表起伏度( $X_2$ )反映地表高低起伏差异,体现区域开展人类活动的成本和难度高低<sup>[41]</sup>,基于数字高程模型采用均值变点法计算得到,计算窗口大小为  $41 \times 41$  个像元矩形(约  $1.51 \text{ km}^2$ )<sup>[42]</sup>;降水( $X_3$ )和气温( $X_4$ )使用多年平均降水量和多年平均气温表征区域气候状况;植被净初级生产力( $X_5$ )使用多年平均植被净初级生产力表征生态系统的有机物质生产能力。区域发展导向( $X_6$ )使用

重点开发、限制开发和禁止开发 3 种主体功能来表征,反映不同区域的空间管控政策导向,其中禁止开发区涵盖了自然保护区和风景名胜区等各级各类自然文化资源保护区域和重点生态功能区<sup>[43]</sup>;经济规模( $X_7$ )反映区域经济整体发展水平,第一产业占比( $X_8$ )和第二产业占比( $X_9$ )表征区域产业结构;人口密度( $X_{10}$ )表征区域人口集聚状态,人口的集聚带动资本、生产和消费等其他要素的集中,是影响人类活动强度的重要指标<sup>[44]</sup>;道路密度( $X_{11}$ )选取公路交通表征区域交通的可达性和便利性<sup>[45]</sup>;城镇化水平( $X_{12}$ )反映城镇化发展带来人居环境、基础设施和土地利用等要素的变化,与区域生态环境密切相关<sup>[46]</sup>。

表 2 人类活动强度空间分异的影响因素

Table 2 Driving factors to spatial variation of human activity intensity

类型 Type	简称 Abbreviation	影响因素 Driving factors	指标说明 Index interpretation	单位 Unit
自然环境 Natural factors	$X_1$	海拔高度	地形高程平均值	m
	$X_2$	地表起伏度	地形起伏度平均值	m
	$X_3$	降水	多年平均降水量	mm
	$X_4$	气温	多年平均气温	℃
	$X_5$	植被净初级生产力	多年平均植被净初级生产力	kgC m <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup>
社会经济 Socio-economic factors	$X_6$	区域发展导向	重点开发=1、限制开发=2、禁止开发=3	
	$X_7$	经济规模	国内生产总值	万元
	$X_8$	第一产业占比	第一产业增加值与国内生产总值的比值	%
	$X_9$	第二产业占比	第二产业增加值与国内生产总值的比值	%
	$X_{10}$	人口密度	每平方公里常住人口数量	人/km <sup>2</sup>
	$X_{11}$	道路密度	每百平方公里拥有公路里程数	km/100km <sup>2</sup>
	$X_{12}$	城镇化水平	城镇人口与常住人口总数的比值	%

### 2.3 数据及处理

本文涉及的数据主要包括土地利用数据、地形、气候、植被、道路、行政区划以及社会经济等图形、台账和统计数据等(表 3)。图形数据的空间参考统一转换为 CGCS2000 国家大地坐标系和 Albers 等积圆锥投影。

表 3 数据类型、名称、来源及说明

Table 3 Type, name, source, and interpretation of data

数据类型 Data type	数据名称 Data name	来源及说明 Data source and interpretation
土地利用数据 Land use data	1984 年土地利用现状概查数据	第二次全国土壤普查成果土地利用现状概查分县数据表,来源于全国农业区划办公室。
	1997 年和 2008 年土地利用现状变更调查数据	第一次全国土地利用现状变更调查分县数据表,来源于各省区自然资源厅。
	2018 年西藏自治区第二次土地变更调查数据	西藏自治区第二次土地利用变更调查矢量数据,来源于西藏自治区自然资源厅。
	2019 年青海省第三次国土调查数据	青海省第三次国土调查矢量数据,来源于青海省自然资源厅。
地形数据 Topographic elevation	数字高程模型	2018 年中国土地利用遥感监测数据,空间分辨率为 30 m,一级类和二级类的综合精度分别在 95% 和 90% 以上 <sup>[47-48]</sup> ,来源于资源环境科学与数据中心( <a href="https://www.resdc.cn/">https://www.resdc.cn/</a> )。通过与高精度卫星影像和统计数据对比,该数据除建设用地和耕地面积略小于实际值外,总体能够满足精度要求。
		NASADEM 数字高程模型,空间分辨率为 1" (约 30 m),来源于 <a href="https://search.earthdata.nasa.gov/search">https://search.earthdata.nasa.gov/search</a> 。
降水和气温数据 Precipitation and temperature	多年平均降水量和多年平均气温	青藏高原及周边地区气温和降水格点数据(1998—2017),空间分辨率为 1 km <sup>[49]</sup> ,取 1998—2017 年平均值,来源于国家青藏高原科学数据中心( <a href="https://data.tpdc.ac.cn/">https://data.tpdc.ac.cn/</a> )。

续表

数据类型 Data type	数据名称 Data name	来源及说明 Data source and interpretation
植被净初级生产力 Net primary productivity	多年平均植被净初级生产力	MODIS 植被净初级生产力 NPP 年度数据 (MYD17A3HGF_v061), 空间分辨率为 500 m, 单位为 kgC/m <sup>2</sup> /a, 取 2002—2021 年平均值, 来源于 <a href="https://search.earthdata.nasa.gov/search">https://search.earthdata.nasa.gov/search</a> 。
社会经济统计数据 Statistical data	2018 年县级单元国内生产总值、第一产业增加值和第二产业增加值	《中国县域统计年鉴 (县市卷)—2019》 <sup>[50]</sup>
	2018 年县级单元常住人口和城镇人口数量	《中国人口普查分县资料 2020》 <sup>[51]</sup>
	2018 年乡镇单元常住人口数量	《中国 2010 年人口普查分乡、镇、街道资料》 <sup>[52]</sup> 。由于 2020 年第七次人口普查分乡、镇、街道常住人口数据尚未发布, 考虑到短期内区域人口不会发生大的变动, 使用 2010 年第六次人口普查分乡、镇、街道常住人口数据进行替代能够满足研究需要和精度要求。
主体功能类型 Major function type	重点开发、限制开发和禁止开发	各省区主体功能区规划
行政区划 Administrative boundary	县级行政区划	在 1:100 万公众版基础地理信息数据的基础上, 参照民政部县级行政区划变更情况进行修正, 来源于全国地理信息资源目录服务系统 ( <a href="https://www.webmap.cn/">https://www.webmap.cn/</a> )
	乡镇行政区划	地理监测云平台 ( <a href="http://www.dsac.cn/">http://www.dsac.cn/</a> ) 的全国乡镇行政区划数据
道路数据 Road data	公路数据	1:25 万全国基础地理数据库, 数据整体现势性为 2015 年, 来源于全国地理信息资源目录服务系统 ( <a href="https://www.webmap.cn/">https://www.webmap.cn/</a> ),
青藏高原范围界线 Boundary of Qinghai-Tibet Plateau	青藏高原范围与界线地理信息系 统数据 <sup>[53]</sup>	全球变化科学研究数据出版系统 ( <a href="http://www.geodoi.ac.cn/">http://www.geodoi.ac.cn/</a> )

青藏高原自然植被以草地为主, 放牧活动是人类活动的重要部分。青藏高原天然草地的放牧利用程度并不是均匀的, 区域草地总面积并不等同于实际放牧利用面积<sup>[54]</sup>, 直接使用天然草地面积进行人类活动强度测算将导致结果偏误。实际上, 青藏高原天然草地的放牧活动受划区轮牧和冬夏牧场转移等影响, 同一区域草地的全年平均放牧利用率在 50% 左右。受草地生产力高低的限制, 不同类型草地的放牧利用率也有所不同, 草甸类草地最高, 沙地草原、沙地荒漠亚类和高寒荒漠类草地的实际放牧利用程度很低或没有放牧活动。基于西藏自治区和青海省第二次草原资源普查数据以及 1:100 万中国草地资源图集<sup>[55]</sup> 和 1:100 万中国植被图集<sup>[56]</sup> 确定青藏高原县级单元的主要草地类型, 引入不同类型草地的放牧利用率对天然草地面积进行修正, 最后得到可利用天然草地面积。不同类型草地放牧利用率参照西藏自治区第二次草地普查对放牧草地利用率的界定 (表 4)<sup>[57]</sup>。

### 3 结果分析

#### 3.1 人类活动强度时间变化特征

1984—2018 年青藏高原建设用地当量和人类活动强度总体处于低水平发展阶段, 大致以 2008 年为节点, 前期呈现缓慢下降趋势, 后期迅速上升 (图 2)。1984 年青藏高原建设用地当量为 44731.27 km<sup>2</sup>, 人类活动强度为 1.44%; 1997 年建设用地当量和人类活动强度分别为 42521.21 km<sup>2</sup> 和 1.40%, 相比 1984 年分别下降 2210.06 km<sup>2</sup> 和 0.04%; 2008 年建设用地当量和人类活动强度分别为 41672.60 km<sup>2</sup> 和 1.37%, 相比 1997 年分别下降 848.61 km<sup>2</sup> 和 0.03%; 总体来看, 1984—2008 年建设用地当量和人类活动强度分别下降 3058.67 km<sup>2</sup> 和 0.07%, 人类活动强度呈现弱化趋势, 这与退耕还林还草和生态环境保护所带来的耕地和建设用地减少有关, 1984—2008 年青藏高原耕地和建设用地面积分别下降 20.63% 和 33.22%, 林地面积增加 8.85%。2018 年青藏高原建设用地当量和人类活动强度分别为 51147.26 km<sup>2</sup> 和 1.70%, 相比 2008 年分别上升 9474.66 km<sup>2</sup> 和 0.33%, 其原因在于近 10 年来的土地整治和综合开发、工业化进程以及交通基础设施建设带来耕地和建设用地

地面积的快速增加,以及气候变暖背景下青藏高原植被覆盖好转和放牧利用草地面积的增加<sup>[58]</sup>,耕地和建设用地分别增加 58.16%和 50.23%,草地面积增加 24.58%。

表 4 青藏高原不同类型草地放牧利用率

Table 4 Grazing utilization of different grassland types on the Qinghai-Tibet Plateau

草地类型 Grassland type	利用率/% Utilization	草地类型 Grassland type	利用率/% Utilization
低地草甸类 Lowland meadow	50	沙地草原 Sandy steppe	20
山地草甸类、高寒沼泽化草甸亚类 Mountain meadow, subclass of alpine swampy meadow	55	温性荒漠类和温性草原化荒漠类 Temperate desert, temperate steppe desert	30
高寒草甸类 Alpine meadow	50	沙地荒漠亚类 Subclass of sandy desert	15
温性草甸草原类 Temperate meadow steppe	50	高寒荒漠类 Alpine desert	0
温性草原类、高寒草甸草原类 Temperate steppe, alpine meadow steppe	45	暖性草丛、灌草丛草原 Warm bush, scrub bush steppe	50
温性荒漠草原类、高寒草原类 Temperate desert steppe, alpine steppe	40	热性草丛、灌草丛草原 Thermal bush, scrub bush steppe	55
高寒荒漠草原类 Alpine desert steppe	35	沼泽类 Swamp	25

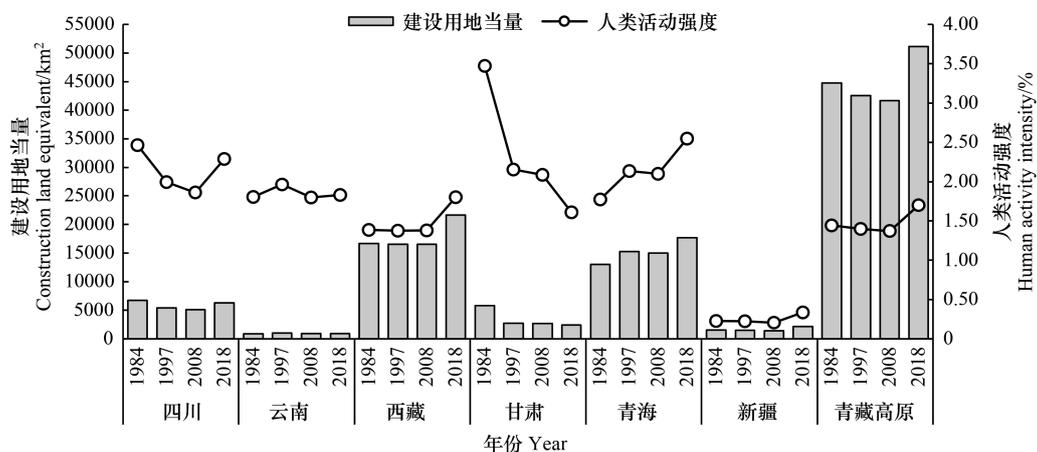


图 2 1984—2018 年建设用地当量和人类活动强度变化

Fig.2 Change of construction land equivalent and human activity intensity from 1984 to 2018

青藏高原各省级区域人类活动强度时序变化的差异明显。2018 年,青海、四川、云南、西藏、甘肃和新疆的人类活动强度分别为 2.55%、2.29%、1.83%、1.80%、1.61%和 0.34%。西藏和青海是青藏高原人类活动的主要承载区域,建设用地当量占比分别从 1984 年的 37.33%和 29.16%上升到 2018 年的 42.37%和 34.62%,人类活动强度总体呈不同程度上升趋势。青海的人类活动强度及其增速显著高于西藏,西藏人类活动强度变化以 2008 年为节点,前期基本保持稳定,后期显著上升,人类活动强度从 2008 年的 1.38%上升至 1.80%,而 1984—2018 年青海人类活动强度整体呈不断上升趋势,从 1984 年的 1.78%上升至 2018 年的 2.55%。西藏和青海的人类活动强度变化主要表现在建设用地的快速上升和放牧利用草地的增加,1984—2018 年建设用地面积分别增加 238.76%和 143.69%,草地面积分别增加 30.11%和 28.84%,反映了近年来西藏和青海工业发展和大规模交通基础设施建设使得人类活动强度显著增强,同时受到气候变化和青藏高原增温增湿的影响更为明显。

四川和甘肃的建设用地当量低于青海和西藏,但人类活动强度总体处于较高水平。四川的人类活动强度先快速下降后迅速提升,从 1984 年的 2.46%下降到 2008 年的 1.86%,再上升到 2018 年的 2.29%;甘肃的人类

活动强度总体呈持续下降趋势,从1984年的3.47%下降到2018年的1.61%。四川和甘肃的人类活动强度变化主要体现在建设用地的快速下降,1984—2018年建设用地面积分别下降80.07%和89.84%,表明川西横断山区和祁连山地的矿山生态修复等生态环境保护措施等取得显著效果;同时1984—2008年退耕还林还草工程进一步降低了四川和甘肃的人类活动强度,耕地面积分别下降37.26%和27.99%,2008年后由于土地综合开发导致耕地面积增加,人类活动强度有所上升。云南和新疆的人类活动强度总体处于低水平稳定状态。总的看来,青藏高原边缘地区,特别是四川和甘肃受到退耕还林还草等生态保护工程的影响更为显著(图3)。

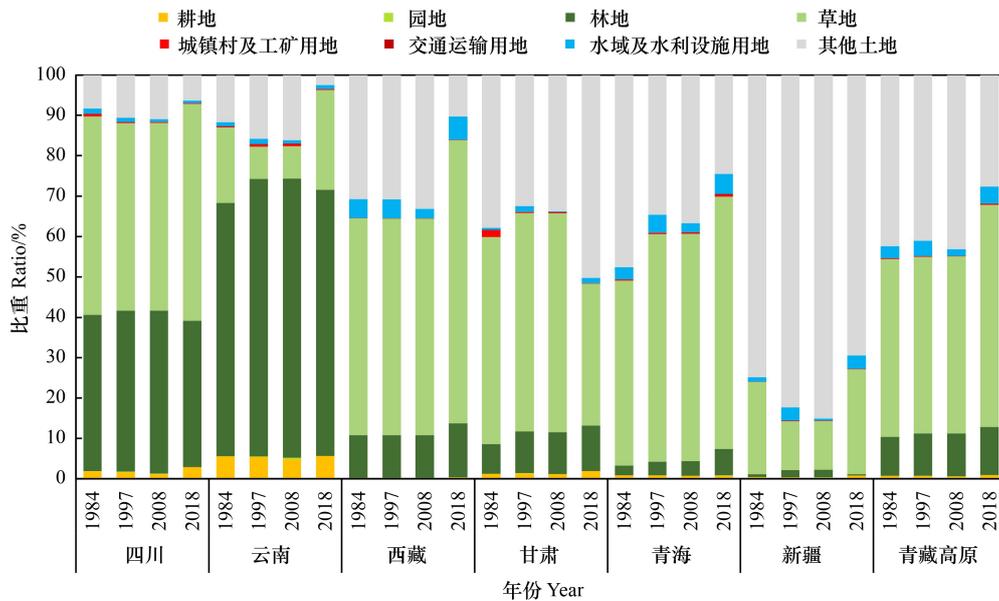


图3 1984—2018年土地利用类型变化

Fig.3 Land use type change from 1984 to 2018

### 3.2 人类活动强度空间分异特征

基于县级单元测算1984年、1997年、2008年和2018年人类活动强度,根据青藏高原人类活动模式和数据分布特点,将研究时段内县级单元人类活动强度按照 $<1.6\%$ 、 $1.6\%—2.4\%$ 、 $2.4\%—3.3\%$ 、 $3.3\%—4.7\%$ 和 $>4.7\%$ 的分级标准划分为高、较高、中等、较低和低五个等级(图4,表5)。1984—2018年青藏高原总体呈现“两区一带”的人类活动强度空间格局,分别为青海河湟谷地和西藏“一江两河”地区(雅鲁藏布江、拉萨河和年楚河)两个人类活动强度高值区,沿日喀则-拉萨-那曲-玉树-果洛-西宁形成条带状的人类活动强度相对高值分布区。

(1)人类活动高强度区。1984—2018年县级单元均值变化较大,以1997年为节点呈现前期上升后期降低的趋势。县级单元数量在1984—2008年间基本保持稳定,主要呈现以拉萨市城关区为核心,以西宁市区为核心的两个人类活动高强度区。2018年县级单元数量快速增加至21个,形成以日喀则桑珠孜区,以拉萨市城关区、堆龙德庆区和达孜区为核心的拉萨都市区,以及以西宁市和海东市城区为核心的西宁都市区组成的人类活动高强度区。该区域是青藏高原最主要的人口聚集区和城镇发展区,人类活动对地表的改造和影响程度最深。

(2)人类活动较高强度区。1984—2018年县级单元均值总体保持稳定,处于 $3.8\%$ 左右,县级单元数量在2018年有所增加。人类活动较高强度区以西藏和青海的高强度区为核心,分布在拉萨、日喀则和山南的西藏“一江两河”地区,以及青东南和甘南的河湟谷地区,该区域人口和城镇相对密集,是青藏高原主要的农业发展区,人类活动对地表的影响主要体现在农业生产活动。

(3)人类活动中等强度区。1984—2018年县级单元人类活动强度均值基本稳定在 $2.8\%$ 左右,县级单元

数量在 1984—2008 年总体保持稳定,到 2018 年迅速增加至 50 个,主要为西藏“一江两河”地区以及青南高原的人类活动强度等级向上跃升,由较低强度区向上转移为中等强度区,表明该区域近年来的人类活动显著增强,主要原因在于放牧利用的强度和规模增大。研究时段内,人类活动中等强度区以高强度和较高强度区为核心,大致沿日喀则-拉萨-那曲-玉树-果洛-西宁形成带状分布空间格局,且有向青南高原核心区和柴达木盆地扩展的趋势。

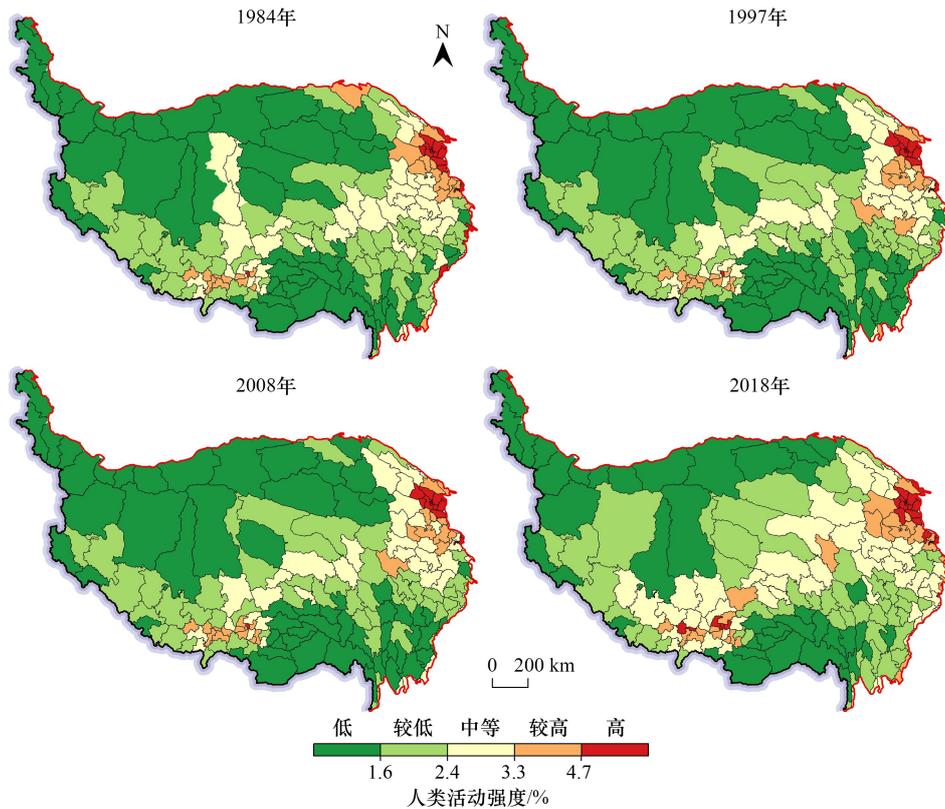


图 4 1984、1997、2008、2018 年县级单元人类活动强度空间分布

Fig.4 Spatial distribution of human activity intensity by county level in 1984, 1997, 2008, 2018

表 5 1984、1997、2008、2018 年县级单元人类活动强度分级统计

Table 5 Classification statistics of human activity intensity by county level in 1984, 1997, 2008, 2018

等级 Class	1984 年		1997 年		2008 年		2018 年	
	县级单元数量 County number	均值/% Mean						
高 Highest class	16	10.30	14	18.79	14	16.21	21	13.15
较高 High class	22	3.84	23	3.78	21	3.70	27	3.81
中等 Moderate class	39	2.85	39	2.88	36	2.88	50	2.78
较低 Low class	52	2.03	52	2.09	55	2.08	49	2.01
低 Lowest class	52	0.91	61	0.94	63	0.92	42	0.88

(4) 人类活动较低强度区。1984—2018 年县级单元数量和人类活动强度均保持相对稳定,人类活动强度均值在 2% 左右,主要分布在雅鲁藏布江上游流域、阿里狮泉河流域地区以及川西横断山区等,且有向羌塘高原和柴达木盆地等扩展的趋势。

(5) 人类活动低强度区。1984—2018 年县级单元人类活动强度均值基本稳定在 0.9% 左右,主要分布在青藏高原东南部的高山峡谷区以及西北部的高寒区和荒漠区。川藏高山峡谷区受地形地貌的强限制,人类活

动强度较弱且主要分布在峡谷之中;羌塘高原和帕米尔山区等高寒区是青藏高原生存环境最恶劣的区域,海拔高且干旱,极不适宜开展人类活动。

为更清晰地揭示青藏高原人类活动强度的空间格局,基于乡镇单元测算 2018 年青藏高原人类活动强度,按照<2.2%、2.2%—2.9%、2.9%—4.7%、4.7%—8.9%和>8.9%的分级标准将人类活动强度划分为高、较高、中等、较低和低五个等级(图 5)。人类活动强度高、较高、中等、较低和低等级的乡镇数量分别为 163、181、395、461 和 737 个,人类活动强度均值分别为 20.40%、6.36%、3.52%、2.55%和 1.39%。乡镇单元尺度的人类活动强度进一步验证了青藏高原“两区一带”的人类活动强度空间格局,同时也揭示了人类活动强度空间分布的点状特征,省会城市、地级城市和县级城市建成区的人类活动强度等级逐级递减的趋势显著,呈现以各级行政中心建成区为核心向周边区域递减的“核心—边缘”结构。川藏高山峡谷区受地形地貌等自然本底条件的限制,人类活动集中分布在峡谷地区,呈现以重点城镇为高值核心的孤立点状空间分布特征。柴达木盆地地广人稀,气候干旱,人类活动模式以工矿业和绿洲农业为主,同时光伏发电和风力发电等开发建设强度较大,工农业集中的少数城镇人类活动强度较高,呈现点状分布特征。

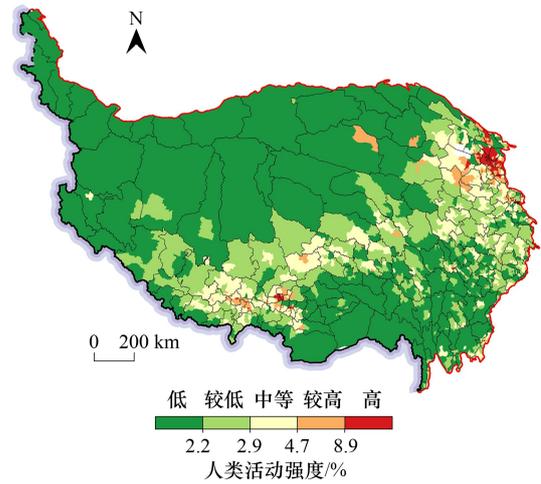


图 5 2018 年乡镇单元人类活动强度空间分布  
Fig.5 Spatial distribution of human activity intensity by town level in 2018

3.3 人类活动强度空间分异的影响因素

以乡镇单元为空间分析尺度,以 2018 年人类活动强度为被解释变量,选取海拔高度( $X_1$ )、地表起伏度( $X_2$ )、降水( $X_3$ )、气温( $X_4$ )和植被净初级生产力( $X_5$ )5 个自然环境因素,区域发展导向( $X_6$ )、经济规模( $X_7$ )、第一产业占比( $X_8$ )、第二产业占比( $X_9$ )、人口密度( $X_{10}$ )、道路密度( $X_{11}$ )和城镇化水平( $X_{12}$ )7 个社会经济要素,使用地理探测器模型定量解析青藏高原人类活动强度空间分异的影响因素及其作用大小(表 6)。

表 6 2018 年人类活动强度空间分异影响因素的地理探测结果

Table 6 Geographical detection results of factors influencing the spatial distribution of human activity intensity in 2018

简称 Abbreviation	影响因素 Driving factors	因子探测 $q$ 值 $q$ value of factor detector	交互作用探测 $q$ 值 $q$ value of interaction detector											
			$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$X_8$	$X_9$	$X_{10}$	$X_{11}$	$X_{12}$
$X_1$	海拔高度	0.09***		■	■	■	■	■	■	■	■	●	●	■
$X_2$	地表起伏度	0.41***	0.69		■	■	▲	●	●	■	■	●	●	●
$X_3$	降水	0.11***	0.34	0.61		■	■	■	■	■	■	●	■	■
$X_4$	气温	0.06***	0.43	0.69	0.67		■	■	■	■	■	●	●	■
$X_5$	植被净初级生产力	0.05***	0.20	0.36	0.26	0.21		■	●	●	■	●	●	●
$X_6$	区域发展导向	0.15***	0.28	0.51	0.26	0.38	0.24		●	■	■	●	●	■
$X_7$	经济规模	0.49***	0.71	0.77	0.69	0.72	0.53	0.53		●	●	●	●	●
$X_8$	第一产业占比	0.16***	0.57	0.58	0.46	0.63	0.20	0.35	0.52		■	●	●	●
$X_9$	第二产业占比	0.06***	0.34	0.58	0.46	0.60	0.22	0.48	0.55	0.49		●	●	■
$X_{10}$	人口密度	0.90***	0.92	0.93	0.94	0.93	0.90	0.91	0.91	0.92	0.92		●	●
$X_{11}$	道路密度	0.77***	0.80	0.87	0.89	0.81	0.77	0.84	0.84	0.82	0.82	0.93		●
$X_{12}$	城镇化水平	0.34***	0.65	0.67	0.66	0.69	0.36	0.54	0.56	0.47	0.56	0.91	0.84	

其中,\*\*\*表示显著性  $P<0.01$ ;■表示非线性增强,●表示双因子增强,▲表示单因子非线性减弱

因子探测结果显示自然环境和社会经济因素的解釋力  $q$  值均通过了  $p < 0.01$  的显著性检验,在不考虑其他因素影响的前提下解釋力  $q > 0.1$  的因素排序依次为人口密度(0.90)>道路密度(0.77)>经济规模(0.49)>地表起伏度(0.41)>城镇化水平(0.34)>第一产业占比(0.16)>区域发展导向(0.15)>降水(0.11),海拔高度(0.09)、气温(0.06)、植被净初级生产力(0.05)和第二产业占比(0.06)的解釋力  $q$  值在 0.1 以下。自然环境因素的平均解釋力  $q$  值为 0.16,社会经济因素的平均解釋力  $q$  值为 0.41,社会经济因素对青藏高原人类活动强度空间分异的解釋力强于自然环境因素。

地表起伏度是  $q$  值最高的自然环境因子,而海拔高度、降水、气温和植被净初级生产力的  $q$  值相对较低,表明青藏高原的人类活动主要受地表起伏的限制,地表起伏度直接影响开展建设活动和耕作活动的成本和难度,也影响牲畜采食概率,地表起伏剧烈的地区,城镇建设、耕作和放牧等人类活动强度相对较低。作为长期自然演化的结果,青藏高原的人类活动模式已适应其自然环境,青藏高原东南部横断山区海拔相对较低,气温、降水和植被覆盖相对较高,人类活动模式主要以高山放牧和河谷农业为主,人口和产业集中在峡谷之中,人类活动强度相对较小;而日喀则-拉萨-那曲-玉树-果洛-西宁的带状区域海拔较高,气温、降水和植被覆盖相对较低,人类活动模式主要为放牧,人类活动的空间范围更大,强度相对更高,其空间分异与自然要素之间存在空间非耦合性。

人口密度是  $q$  值最高的社会经济因子,道路密度、经济规模和城镇化水平的  $q$  值相对较高,表明青藏高原人类活动强度与人口数量、道路交通发展情况、经济社会发展水平和城镇化水平具有较高的相关性,人类活动高强度区域往往也是人口稠密和集中、交通基础设施完善和经济社会整体发展水平较高的地区。第一产业占比、区域发展导向和第二产业占比的  $q$  值相对较低,表明区域产业结构与人类活动强度的空间相关性较弱,自然保护区等空间管控并不能较好解释青藏高原人类活动强度的空间分异。

进一步探测影响因素对人类活动强度空间分异的交互作用。影响因素的两两交互作用对人类活动强度空间分异的解釋力  $q$  值均不同程度增强,主要表现为非线性增强和双因子增强两类。自然环境因素之间的两两交互作用类型多为非线性增强,其交互作用  $q$  值相比于单因子  $q$  值显著提高,表明人类活动强度空间分异并不是受到单一自然环境因素的影响,而是多种自然环境因素共同作用的结果。社会经济因素中的人口密度、道路密度和城镇化水平与其他因素的交互作用类型主要为双因子增强,交互作用解釋力均大于单一因素解釋力;区域发展导向、经济规模、第一产业占比和第二产业占比与其他因素的交互作用类型主要为非线性增强。与单一因素的解釋力相比,青藏高原人类活动强度空间分异受自然环境和社会经济因素交互作用的影响更为强烈,影响因素的交互显著增强了其对人类活动强度空间分异的解釋力。

## 4 讨论

### 4.1 人类活动强度与人口密度的关系

青藏高原人类活动强度空间分异的影响因素地理探测发现,人口密度至少能够解释 90% 的人类活动强度空间分异,与其他因素交互后的解释能力均在 90% 以上。进一步基于第四次(1990 年)、第五次(2000 年)、第六次(2010 年)和第七次(2020 年)人口普查的常住人口数据,将人口密度与 1984 年、1997 年、2008 年、2018 年青藏高原县级单元和 2018 年乡镇单元的人类活动强度进行拟合。拟合结果显示人类活动强度与人口密度存在正向线性函数关系,1984—2018 年县级单元相关系数  $R$  分别为 0.7856、0.8078、0.7642 和 0.8078,2018 年乡镇单元相关系数  $R$  达到 0.8717,县级单元和乡镇单元人类活动强度与人口密度高度相关(图 6)。地理探测器和相关性分析均表明本文测算的人类活动强度与人口密度存在显著的空间相关性,在缺乏高精度土地利用数据的地区可以人口密度为变量,采用二者之间的拟合函数推算出人类活动强度<sup>[59]</sup>。

### 4.2 与现有研究的对比

目前关于青藏高原人类活动强度的高低尚未达成统一的认识。本文在陆地表层人类活动强度测算方法的基础上,结合青藏高原人类活动实际情况,采用不用类型草地放牧利用率对天然放牧草地进行修正,发现青

藏高原 1984—2018 年总体人类活动强度在 1.37%—1.70% 之间,这与三江源国家公园及其周边地区人类活动强度在 1.2% 左右的结论接近,而徐勇<sup>[20]</sup>和 Liu 等<sup>[60]</sup>测算的青藏高原地区 3%—4% 的人类活动强度可能存在高估,其原因在于未针对青藏高原地区天然放牧草地进行修正。

基于多指标综合评价法测算的青藏高原人类活动强度与本文的测算结果不具备直接的可比性,但其空间格局基本一致,存在较大差异的区域主要分布在川藏高山峡谷区。川藏高山峡谷区山高谷深,农牧业等人类活动向沟谷底部及两侧集中,人类活动的空间集中程度和地形条件对人类活动的空间限制作用相比青藏高原其他区域更高,人类活动强度的空间分布更符合点状特征。基于人类足迹指数法等多指标综合评价法测算的川藏高山峡谷区的人类活动强度水平较高,这与其评价指标和计算方法有关,将人口密度和放牧密度等行政单元指标与土地利用和夜间灯光等格网单元指标进行混合测算会导致人类活动高强度区域的空间范围被放大,同时根据距离测算的道路影响范围在峡谷地区也更易被夸大<sup>[7-8]</sup>。因此,基于土地利用类型折算建设用地当量测算的人类活动强度更符合地形条件复杂和人类活动模式各异的青藏高原人类活动实际情况。

## 5 结论与展望

使用土地利用现状调查数据测算和分析了 1984—2018 年青藏高原的人类活动强度及其时空变化特征,使用地理探测器模型解析了人类活动强度空间分异的影响因素,所得结论如下:

(1) 1984—2018 年青藏高原人类活动强度大致以 2008 年为界,前期呈缓慢下降趋势,后期快速上升。四个时间点的人类活动强度分别为 1.44%、1.40%、1.37% 和 1.70%,总体处于低水平发展阶段。各省级单元人类活动强度时间变化差异明显,西藏和青海总体呈上升趋势,四川先下降后上升,甘肃呈不断下降趋势。

(2) 青藏高原人类活动强度空间分布总体上呈现“两区一带”的空间格局,西藏“一江两河”地区(雅鲁藏布江、拉萨河和年楚河)和青海河湟谷地的人类活动强度最高,沿日喀则-拉萨-那曲-玉树-果洛-西宁形成条带状的人类活动强度相对高值分布区,川藏高山峡谷区、藏北-青南高原和帕米尔山区的人类活动强度最低。

(3) 青藏高原人类活动强度空间分异的主要因素为人口密度、道路密度、经济规模、地表起伏度、城镇化水平、第一产业占比和区域发展导向,人口密度是影响人类活动强度空间分异的首要因素,社会经济因素的解释力  $q$  值高于自然环境因素。影响因素的两两交互作用增强了对人类活动强度空间分异的解释力,表现为非线性增强和双因子增强两类,青藏高原人类活动强度空间分异是自然环境因素和社会经济因素共同作用的结果。

本文使用的多时期土地利用现状调查数据受基础数据、调查方法和统计口径不同等的影响存在一定程度的误差,但相比基于卫星遥感反演的土地利用/土地覆被数据而言仍具有很高的数据精度,能够更加准确地反映陆地表层的人类活动强度。本文基于土地利用测算的人类活动强度主要体现人类活动对陆地表层的影响,如建设用地和耕地扩张造成的生态用地占用和生态损失等,对地表上下人类活动影响的考虑不足,如大气污染物排放和水土污染等,应该继续改进测算方法以更加全面地反映人类活动对自然环境的影响。青藏高原人类活动的地域差异明显,人类活动强度具有显著的空间异质性,还应重点考虑不同区域人类活动强度空间分异影响机制的差异性。此外,在人类活动强度测算的基础上探究其引起的区域生态系统服务功能变化等生态环境效应作用机制将是今后研究的重点内容。

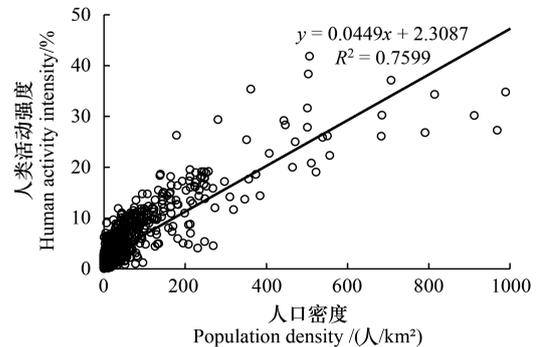


图 6 2018 年乡镇单元人类活动强度与人口密度的相关性散点图  
Fig.6 Correlation scatter between human activity intensity and population density by town level in 2018

## 参考文献 (References):

- [ 1 ] Lewis S L, Maslin M A. Defining the anthropocene. *Nature*, 2015, 519(7542): 171-180.
- [ 2 ] Moore L G, Niermeyer S, Zamudio S. Human adaptation to high altitude: regional and life-cycle perspectives. *American Journal of Physical Anthropology*, 1998, Suppl 27: 25-64.
- [ 3 ] 张东菊, 申旭科, 成婷, 夏欢, 刘武, 高星, 陈发虎. 青藏高原史前人类活动研究新进展. *科学通报*, 2020, 65(6): 475-482.
- [ 4 ] 陈发虎, 夏欢, 高玉, 张东菊, 杨晓燕, 董广辉. 史前人类探索、适应和定居青藏高原的历程及其阶段性讨论. *地理科学*, 2022, 42(1): 1-14.
- [ 5 ] Yang C, Liu H Z, Li Q Q, Wang X Q, Ma W, Liu C L, Fang X, Tang Y Z, Shi T Z, Wang Q B, Xu Y, Zhang J, Li X C, Xu G, Chen J Y, Su M, Wang S Y, Wu J J, Huang L P, Li X, Wu G F. Human expansion into Asian Highlands in the 21st Century and its effects. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 1-12.
- [ 6 ] 樊杰, 徐勇, 王传胜, 牛亚菲, 陈东, 孙威. 西藏近半个世纪以来人类活动的生态环境效应. *科学通报*, 2015, 60(32): 3057-3066.
- [ 7 ] Li S C, Zhang Y L, Wang Z F, Li L H. Mapping human influence intensity in the Tibetan Plateau for conservation of ecological service functions. *Ecosystem Services*, 2018, 30: 276-286.
- [ 8 ] Sun Y X, Liu S L, Shi F N, An Y, Li M Q, Liu Y X. Spatio-temporal variations and coupling of human activity intensity and ecosystem services based on the four-quadrant model on the Qinghai-Tibet Plateau. *Science of the Total Environment*, 2020, 743: 140721.
- [ 9 ] Ni J, Wu T H, Zhu X F, Chen J, Wu X D, Hu G J, Zou D F, Li R, Du Y Z. Quantifying the relationship between human activities intensity and thawing hazards of the frozen ground on the Qinghai-Tibet Plateau. *Frontiers in Earth Science*, 2022, 10: 845873.
- [ 10 ] 刘世梁, 刘芦萌, 武雪, 侯笑云, 赵爽, 刘国华. 区域生态效应研究中人类活动强度量化评价. *生态学报*, 2018, 38(19): 6797-6809.
- [ 11 ] 段群滔, 罗立辉. 人类活动强度空间化方法综述与展望——以青藏高原为例. *冰川冻土*, 2021, 43(5): 1582-1593.
- [ 12 ] Sanderson E W, Jaiteh M, Levy M A, Redford K H, Wannebo A V, Woolmer G. The human footprint and the last of the wild. *BioScience*, 2002, 52(10): 891.
- [ 13 ] Venter O, Sanderson E W, Magrath A, Allan J R, Behr J, Jones K R, Possingham H P, Laurance W F, Wood P, Fekete B M, Levy M A, Watson J E M. Global terrestrial Human Footprint maps for 1993 and 2009. *Scientific Data*, 2016, 3(1): 1-10.
- [ 14 ] Li S C, Wu J S, Gong J, Li S W. Human footprint in Tibet: assessing the spatial layout and effectiveness of nature reserves. *Science of the Total Environment*, 2018, 621: 18-29.
- [ 15 ] Mu H W, Li X C, Wen Y N, Huang J X, Du P J, Su W, Miao S X, Geng M Q. A global record of annual terrestrial Human Footprint dataset from 2000 to 2018. *Scientific Data*, 2022, 9(1): 1-9.
- [ 16 ] Tan L Y, Guo G C, Li S C. The Sanjiangyuan nature reserve is partially effective in mitigating human pressures. *Land*, 2021, 11(1): 43.
- [ 17 ] Cheng Y, Liu H, Chen D M, Liu H M. Human activity intensity and its spatial-temporal evolution in China's border areas. *Land*, 2022, 11(7): 1089.
- [ 18 ] 陈泓瑾, 刘琳, 张正勇, 刘亚, 田浩, 康紫薇, 王统霞, 张雪莹. 天山北坡人类活动强度与地表温度的时空关联性. *地理学报*, 2022, 77(5): 1244-1259.
- [ 19 ] 刘永婷, 杨钊, 徐光来, 杨强强, 刘世杰, 何开玲. 基于四象限模型的生态系统服务与人类活动强度关联性分析——以皖南国际旅游文化示范区为例. *生态学报*, 2022, 42(13): 5200-5210.
- [ 20 ] 徐勇, 孙晓一, 汤青. 陆地表层人类活动强度: 概念、方法及应用. *地理学报*, 2015, 70(7): 1068-1079.
- [ 21 ] 徐小任, 徐勇. 黄土高原地区人类活动强度时空变化分析. *地理研究*, 2017, 36(4): 661-672.
- [ 22 ] 贾艳艳, 唐晓岚, 张卓然. 长江中下游流域自然保护区空间分布及其与人类活动强度关系研究. *世界地理研究*, 2020, 29(4): 845-855.
- [ 23 ] 刘采, 张海燕, 李迁. 1980—2018年海南岛人类活动强度时空变化特征及其驱动机制. *地理科学进展*, 2020, 39(4): 567-576.
- [ 24 ] 孙永光, 赵冬至, 吴涛, 卫宝泉, 高树刚, 李媛, 曹芳芳. 河口湿地人为干扰度时空动态及景观响应——以大洋河口为例. *生态学报*, 2012, 32(12): 3645-3655.
- [ 25 ] 周侃, 张健, 虞虎, 钱者东. 国家公园及周边地区人为扰动强度的时空变化与驱动因素——以三江源国家公园为例. *生态学报*, 2022, 42(14): 5574-5585.
- [ 26 ] 孙鸿烈, 郑度, 姚檀栋, 张懿铨. 青藏高原国家生态安全屏障保护与建设. *地理学报*, 2012, 67(1): 3-12.
- [ 27 ] 傅伯杰, 欧阳志云, 施鹏, 樊杰, 王小丹, 郑华, 赵文武, 吴飞. 青藏高原生态安全屏障状况与保护对策. *中国科学院院刊*, 2021, 36(11): 1298-1306.
- [ 28 ] 张海燕, 辛良杰, 樊江文, 袁秀. 高原人类活动强度数据(2012—2017). 国家青藏高原科学数据中心, 2019. <https://doi.org/10.11888/HumanNat.tpdc.271911>. <https://cstr.cn/18406.11.HumanNat.tpdc.271911>.

- [29] 段群滔, 罗立辉. 青藏高原人类足迹数据集(1990—2017). 国家青藏高原科学数据中心, 2021. <https://doi.org/10.11922/sciencedb.933>.
- [30] 刘世梁, 孙永秀, 刘轶轩, 李明琦. 青藏高原农牧区人类活动强度 1km 网格数据集(1990-2015). 国家青藏高原科学数据中心, 2021. <https://doi.org/10.11922/sciencedb.00171>.
- [31] 方创琳. 青藏高原城镇化发展的特殊思路与绿色发展路径. 地理学报, 2022, 77(8): 1907-1919.
- [32] 中华人民共和国自然资源部. TD/T 1055—2019 第三次全国国土调查技术规程. 北京: 地质出版社, 2019.
- [33] 中国可再生能源学会. T/CRES 0005—2020 风电场绿色评估指标. 北京: 全国团体标准信息平台, 2020.
- [34] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134.
- [35] 宋颺, 刘艳晓, 张瑜, 王士君. 中国手足口病时空分异特征及影响因素. 地理学报, 2022, 77(3): 574-588.
- [36] 王秀伟, 李晓军. 中国乡村旅游重点村的空间特征与影响因素. 地理学报, 2022, 77(4): 900-917.
- [37] Song Y Z, Wang J F, Ge Y, Xu C D. An optimal parameters-based geographical detector model enhances geographic characteristics of explanatory variables for spatial heterogeneity analysis: cases with different types of spatial data. *GIScience & Remote Sensing*, 2020, 57(5): 593-610.
- [38] 史培军, 陈彦强, 张安宇, 何研, 高妙妮, 杨静, 毛睿, 吴吉东, 叶涛, 效存德, 徐柏青. 青藏高原大气氧含量影响因素及其贡献率分析. 科学通报, 2019, 64(7): 715-724.
- [39] 史培军, 陈彦强, 马恒, 叶涛, 唐海萍, 王静爱. 再论青藏高原近地表大气相对氧含量影响因素的贡献率. 科学通报, 2021, 66(31): 4028-4035.
- [40] 徐勇, 王丽佳, 杨华. 青藏高原土地资源人类活动适宜性评价方法及实证应用. 地理学报, 2022, 77(7): 1615-1633.
- [41] 封志明, 唐焰, 杨艳昭, 张丹. 中国地形起伏度及其与人口分布的相关性. 地理学报, 2007, 62(10): 1073-1082.
- [42] 封志明, 李文君, 李鹏, 肖池伟. 青藏高原地形起伏度及其地理意义. 地理学报, 2020, 75(7): 1359-1372.
- [43] 国务院办公厅. 全国主体功能区规划. (2011-06-08) [2022-10-14]. [http://www.gov.cn/zw/gk/2011-06/08/content\\_1879180.htm](http://www.gov.cn/zw/gk/2011-06/08/content_1879180.htm).
- [44] 王超, 阚媛珂, 曾业隆, 李国庆, 王民, 次仁. 基于随机森林模型的西藏人口分布格局及影响因素. 地理学报, 2019, 74(4): 664-680.
- [45] 陈舒婷, 李裕瑞, 潘玮, 王武林, 金凤君. 中国县域陆路交通优势度格局演化及经济效应. 地理学报, 2022, 77(8): 1937-1952.
- [46] 任宇飞, 方创琳, 孙思奥, 鲍超, 刘若文. 城镇化与生态环境近远程耦合关系研究进展. 地理学报, 2020, 75(3): 589-606.
- [47] 徐新良, 刘纪远, 张树文, 李仁东, 颜长珍, 吴世新. 中国多时期土地利用遥感监测数据集(CNLUCC). 资源环境科学数据注册与出版系统(<http://www.resdc.cn/DOI>), 2018. <https://doi.org/10.12078/2018070201>.
- [48] 匡文慧, 张树文, 杜国明, 颜长珍, 吴世新, 李仁东, 陆灯盛, 潘涛, 宁静, 郭长庆, 董金玮, 包玉海, 迟文峰, 窦银银, 侯亚丽, 尹哲睿, 常丽萍, 杨久春, 谢家丽, 邱娟, 张汉松, 张宇博, 杨仕琪, 萨日盖, 刘纪远. 2015—2020 年中国土地利用变化遥感制图及时空特征分析. 地理学报, 2022, 77(5): 1056-1071.
- [49] 丁明军. 青藏高原及周边地区气温和降水格点数据(1998—2017). 国家青藏高原科学数据中心, 2019. <https://doi.org/10.11888/Meteoro.tpdc.270239>. <https://cstr.cn/18406.11.Meteoro.tpdc.270239>.
- [50] 国家统计局农村社会经济调查司. 中国县域统计年鉴—2019(县市卷乡镇卷套装共 2 本). 北京: 中国统计出版社, 2020.
- [51] 国务院第七次全国人口普查领导小组办公室. 中国人口普查分县资料 2020. 北京: 中国统计出版社, 2022.
- [52] 国务院人口普查办公室, 国家统计局人口和就业统计司. 中国 2010 年人口普查分乡、镇、街道资料. 北京: 中国统计出版社, 2012.
- [53] 张懿铨, 李炳元, 郑度. 青藏高原范围与界线地理信息系统数据. 全球变化数据仓储电子杂志(中英文), 2014. <https://doi.org/10.3974/geodb.2014.01.12.V1>.
- [54] 胡晓阳, 王兆锋, 张懿铨, 宫殿清. 青藏高原放牧强度空间化方法与应用. 地理学报, 2022, 77(3): 547-558.
- [55] 1:1000000 中国草地资源图编制委员会. 1:1000000 中国草地资源图集. 北京: 中国地图出版社, 1993.
- [56] 侯学煜主编. 中国科学院中国植被图编辑委员会编纂. 1:1000000 中国植被图集. 北京: 科学出版社, 2001.
- [57] 西藏自治区农牧厅. 西藏自治区草地资源与生态. 北京: 中国农业出版社, 2018.
- [58] Wang Y F, Lv W W, Xue K, Wang S P, Zhang L R, Hu R H, Zeng H, Xu X L, Li Y M, Jiang L L, Hao Y B, Du J Q, Sun J P, Dorji T, Piao S L, Wang C H, Luo C Y, Zhang Z H, Chang X F, Zhang M M, Hu Y G, Wu T H, Wang J Z, Li B W, Liu P P, Zhou Y, Wang A, Dong S K, Zhang X Z, Gao Q Z, Zhou H K, Shen M G, Wilkes A, Miede G, Zhao X Q, Niu H S. Grassland changes and adaptive management on the Qinghai - Tibetan Plateau. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2022, 3(10): 668-683.
- [59] 薛陈利, 张会琼, 邹滔, 孙紫坚, 程细音. 中老铁路经济廊带生态质量及其与人类活动的关系. 应用生态学报, 2021, 32(2): 638-648.
- [60] Liu C, Zhang H Y, Gan F P, Lu Y G, Wang H, Zhang J H, Ju X. Identifying the spatio-temporal variability of human activity intensity and associated drivers: a case study on the Tibetan Plateau. *Frontiers of Earth Science*, 2022, 16(3): 744-756.