

山区过渡性地理空间人文自然交互性 识别与分异解析

张少尧^{1,4}, 邓 伟^{1,3,4}, 胡茂桂², 张 昊³, 王占韵³, 彭 立^{1,4}

(1. 四川师范大学地理与资源科学学院, 成都 610066; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所
资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101; 3. 中国科学院成都山地灾害与环境研究所,
成都 610041; 4. 四川师范大学川西高原资源环境与可持续发展研究中心, 成都 610066)

摘要: 山区因其人文自然交互过程具有显著的地域性、时空分异性与不确定性, 成为典型的过渡性地理空间, 其类型量化识别与分异特征的解析可为山区乡村振兴背景下国土空间高质量发展提供决策依据。本文基于地理不确定性的概念构建时空变率指数, 识别出中国山区过渡性地理空间分布与分区, 并运用地理探测器解析其地理时空变率的驱动力谱。结果发现: 中国山区过渡性地理空间总面积为 $238.32 \times 10^4 \text{ km}^2$ (约占中国陆表面积的 1/4), 其地理时空变率从第一阶梯到第三阶梯呈递减趋势; 全国山区过渡性地理空间可分为 12 个分区, 其中昆仑—祁连山分区面积最大; 人文驱动因子对人口与土地利用的时空变率解析力最强, 基础地形因子对植被覆盖时空变率与地理时空变率指数的解析力最为显著, 各因子中海拔与夜间灯光的解析驱动力最强。整体而言, 人文要素的时空动态均对东南山区过渡性地理空间具有显著的塑造性, 而西北山区过渡性地理空间主要受到自然要素的时间变化和人文要素的空间变化所驱动。本文为山区过渡性地理空间的不确定性、多样性与人文关系地域性的定量研究提供了新的见解与启示。

关键词: 人文自然交互; 山区过渡性地理空间; 时空变率; 地理不确定性; 信息熵

DOI: 10.11821/dlxb202205013

1 引言

山地的存在让陆地表层空间变得更加多样化和复杂化, 特别是在日益活跃的人类活动影响下, 山区人文自然交互关系的时空动态性与不确定性不断增强, 其交互性、耦合度存在鲜明的分异性^[1-2]。在人文自然交互过程中的动态性与复合性的塑造下, 山区国土空间呈现出显明的不确定性、变化性(缓变、急变)、交互性与过渡性, 如城乡过渡区^[3]、农牧过渡区^[4]、生态过渡区^[5]与地形阶梯过渡区^[6]等。在这些过渡区中, 山区部分的人文活动与自然景观的空间分布、过程模式与区域关联深刻地受到山区地表过程的复杂性、分异性与多样性的影响^[7-8]。山区最为直观、最为基础的过渡性特征便是地形的起伏与变化, 由此塑造了山地表层过程的空间分异, 进而决定了地理景观的格局与分异规律。如地形梯度变化对植被垂直带谱与景观的影响^[9-11], 山区在全球变化影响下物种与群落变化更加敏感与不稳定^[12], 山区也面临着比平原区更高的气候变化风险与适应的不

收稿日期: 2021-09-17; 修订日期: 2022-04-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(41930651) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41930651]

作者简介: 张少尧(1993-), 男, 四川巴中人, 博士, 助理研究员, 中国地理学会会员(S110014361M), 研究方向为人口地理与国土空间发展。E-mail: zhangsyxs@sicnu.edu.cn

通讯作者: 邓伟(1957-), 男, 辽宁沈阳人, 博士, 研究员, 博士生导师, 研究方向为山区资源环境与国土空间发展。
E-mail: dengwei@sicnu.edu.cn

确定性^[13]。不仅如此,山区对人类活动的限制性以及人类活动对山地环境的适应性表现出明显的过渡特征。相比平原区,山区的人类活动更加受限于海拔、坡度、降水与温度的变化等^[6]。如人口和经济随海拔的递减性^[7-8],城镇化所带来的人口流迁对山区土地利用转型^[14]、植被覆盖^[15]与经济社会发展^[16]产生了一系列不同于平原区的新变化和影响^[17]。在时空综合维度上,山区的人地关系也因地形位的影响其地域性具有明显的多尺度分异特征^[18-19],如山区乡村性与区域发展模式的空间分异性更强,其发展政策更加要求因地制宜^[16]。由此可见,山区的人文自然地理交互过程表现出更为显著的时空分异性、地域性与不确定性,进而呈现为典型的过渡性地理空间。

人文自然交互已成为陆表系统演变这一宏大地理叙事的主体,其交互性不仅体现在人文自然要素的时空交互上,更体现在其过程的动态演变与时空变率上^[20-22],即时间动态变化作用于要素量值变化并引发空间分异程度的变化,空间动态变化映射于要素空间格局并嵌套在时间序列变化中^[23-24]。在此过程中,所呈现出来的人文自然时空交互性、动态性及其变率,便是地理不确定性^[1]。因此,解析人文自然交互过程的时空变率特征与规律,以及外部驱动和内部响应的耦合、协同过程是准确识别山区过渡性地理空间并认知其国土空间特性之要,而这亟待以科学方法定量表达人文自然要素的地理不确定性(地理时空变率)。

在现代地理过程的时空演化解析中,发现人文因素的驱动性日益显著。如人文过程中的城镇化推动人口集聚,进而引发GDP增长与城镇扩张^[25-26]。自然过程虽然缓慢但影响范围巨大,如全球变化下气温与降水时空波动引发森林、草原与农田等生态系统的时空变化与响应^[27-29]。同时,人文自然过程均集中反映在土地利用变化过程中,如建设用地扩张、耕地撂荒、退耕还林与草场退化等^[30-31]。这其中,人口、植被分别是人文与自然过程中最具代表性的地理要素^[31],土地利用则成为人地关系与人文自然交互过程的指示要素^[32]。因此,人口、植被与土地利用的时空变化可以看作人文与自然交互过程时空动态性的综合表征要素^[21, 33-34]。

综上所述,本文所阐释的山区过渡性地理空间,是指介于平原都市人口密集区(人文过程主导)与高山自然保留区(自然过程主导)之间,承载着中小城镇与乡村、山区耕地、森林与草原等地域类型的地理空间(图1)。在不同时期政策驱动下,山区国土空间开发格局的变化表征人地关系的时空演变,并导致山区人文自然交互格局、组分与过渡特征的动态变化,如城镇扩张占用耕地^[35],局部土地利用强度增加驱动人文性增加自然性减弱;乡村空心化引发耕地撂荒^[30],森林植被增加驱动人文性减弱自然性增强。这一切共同构成了山区过渡性地理空间的时空演变,其时空变率体现出人文自然交互下的不确定性与过渡性。

在国土空间研究中,过渡性地理空间作为认知山区人地关系地域性及其演变的新窗口,对其识别应基于地理不确定性的视角^[1],从多维度综合定量表征人文与自然要素的时空变率。虽然已有研究对各类单一性的过渡性空间进行研究,如城乡过渡区与生态过渡区等^[5, 36],但针对人文自然交互下的过渡性空间综合研究仍显匮乏。因此,对山区过渡性地理空间中的人文自然交互性的量化识别与表征,及其驱动因子与分异特征的解析,已成为新时代国土空间研究的重要科学问题^[1]。山区作为新时代乡村振兴战略实施的关键区域,针对山区过渡性地理空间的研究,不仅可为生态要地与珍稀自然景观保留和人地关系协调提供具有决策价值的科学依据,还有助于制定更具弹性与针对性的山区空间规划与治理政策。

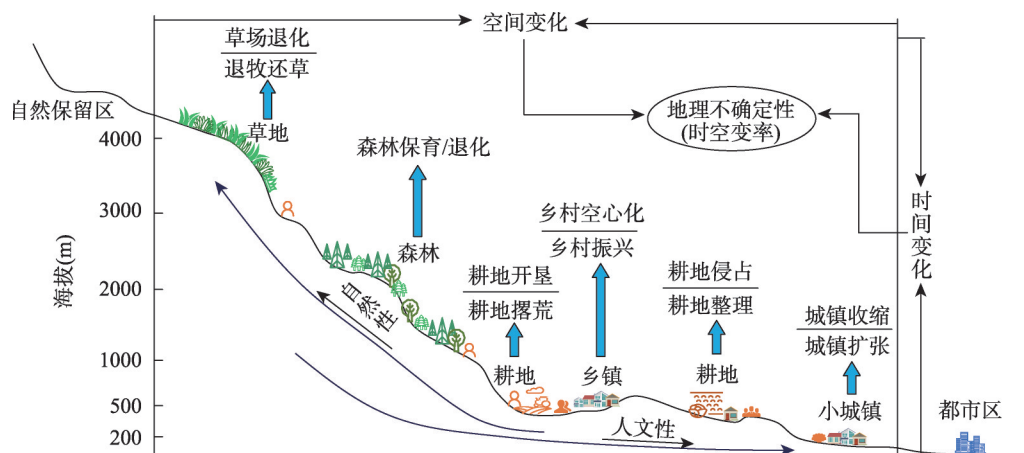


图1 山区过渡性地理空间示意图

Fig. 1 Diagram of mountainous transitional geospace (MTGs)

2 数据与方法

2.1 研究框架

本文遵循如下研究框架(图2): ① 通过时空变率来表征地理过程的不确定性, 并将地理时空变率分为时间变率与空间变率, 并从人文自然交互角度选取人口密度、植被覆盖度(NDVI)分别作为人文性与自然性的正向表征指标, 同时选取土地利用强度作为人文自然交互性的指示指标, 土地利用强度越高, 人文性越强, 自然性越弱; ② 采用时间信息熵与空间坡度系数分别计算所选地理要素的时间与空间变率, 利用空间叠加法计算每个地理要素的时空变率指数, 形成对应的空间分布图; ③ 根据四等分法将各地理要素的时空变率指数的后三等分($\geq 25\%$)提取出来合并为地理时空变率指数, 并叠加全国山区空间分布图, 求取其空间交集。在此基础上, 考虑到山区过渡性地理空间的人文自然复合的主体性特征, 将属于纯粹自然性区域的国家自然保护区和极高山区(海拔 $H \geq 4500$ m)擦除, 形成山区过渡性地理空间分布图; 最后, 根据中国自然地理区划对其进行分区, 选取地形因子、降水量、年均温、GDP与夜间灯光5

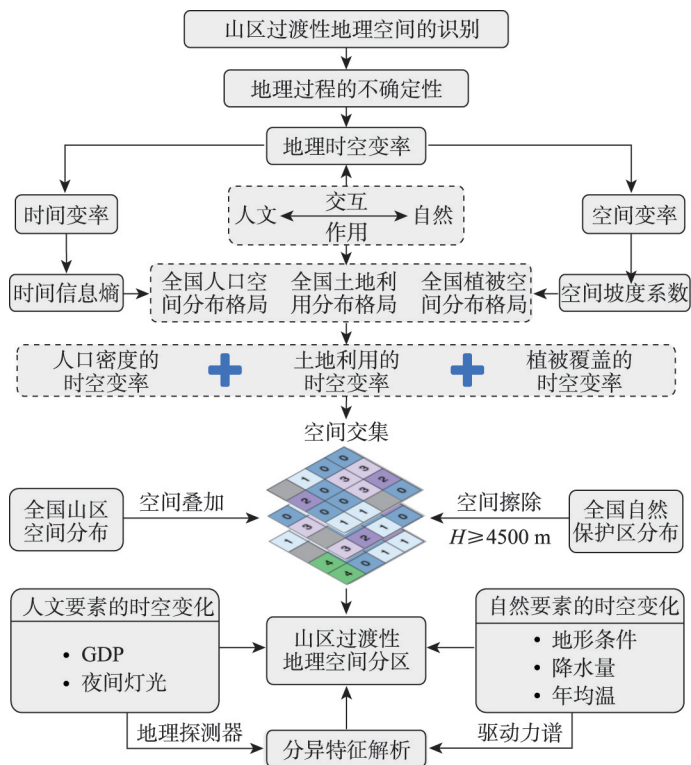


图2 研究框架与逻辑结构

Fig. 2 Research framework and logical structure in this study

在此基础上, 考虑到山区过渡性地理空间的人文自然复合的主体性特征, 将属于纯粹自然性区域的国家自然保护区和极高山区(海拔 $H \geq 4500$ m)擦除, 形成山区过渡性地理空间分布图; 最后, 根据中国自然地理区划对其进行分区, 选取地形因子、降水量、年均温、GDP与夜间灯光5

类指标,运用地理探测器解析各分区内关键驱动因子及其解析力,进而阐述山区过渡性地理空间的驱动力谱及其分异特征。

2.2 数据来源

本文所用各类数据的时序年度、空间分辨率、格式与来源如下(表1),所有栅格数据集空间分辨率、行列号与投影坐标系均实现统一。其中2000—2015年土地利用数据来自中国科学院资源环境科学与数据中心,2020年数据来自自然资源部的Globe Land 30项目,分类标准统一为Globe Land 30的分类系统(10个一级类型);2000—2013年夜间灯光数据为DMSP影像,2014—2019年为VIIRS影像,通过归一法将VIIRS影像校正到DMSP影像辐射范围内。

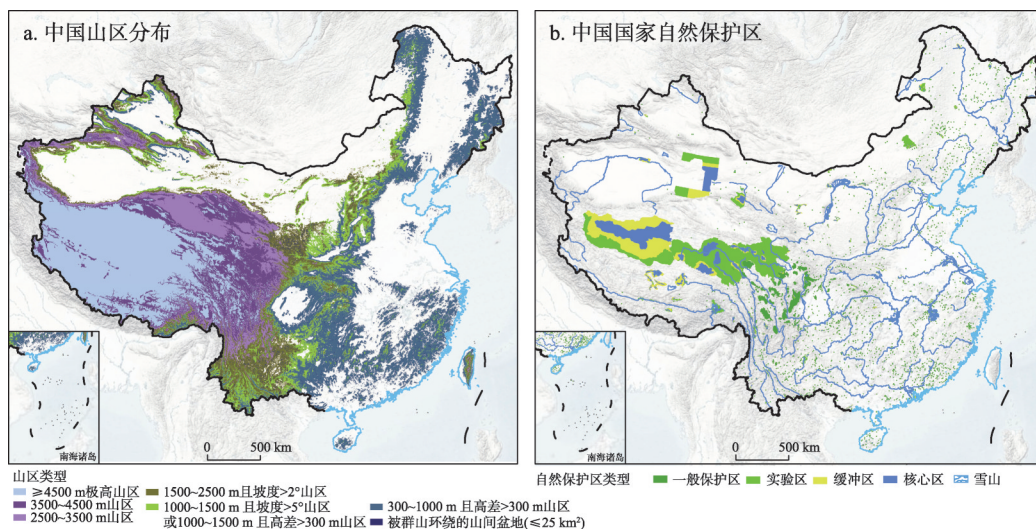
表 1 研究所用主要数据基本概况
Tab. 1 Basic information of the key data used in this study

数据名称	年份(年度)	空间分辨率	格式	来源
人口	2000—2020(21个年度)	1 km	栅格	World Pop项目(www.worldpop.org)
NDVI	2000—2020(21个年度)	1 km	栅格	NASA的MOD13A3产品(https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/)
土地利用	2000、2005、2010、2015、2020(5个年度)	30 m	栅格	中科院资源环境科学与数据中心(http://www.resdc.cn/Default.aspx) Globe Land 30项目(http://www.globallandcover.com/home.html?type=data)
数字高程DEM	/	1 km	栅格	中科院资源环境科学与数据中心
GDP	2000、2005、2010、2015(4个年度)	1 km	栅格	(http://www.resdc.cn/Default.aspx)
年均气温	2000—2015(16个年度)	1 km	栅格	
年降雨量	2000—2015(16个年度)	1 km	栅格	
夜间灯光	2000—2019(20个年度)	1 km	栅格	NOAA的EOG项目(https://ngdc.noaa.gov/eog/index.html)
基础地理	2015	1:100万	矢量	全国地理信息资源目录(http://www.webmap.cn/main.do?method=index)
山区分布	2000	1 km	栅格	UNEP-WCMC(https://www.unep-wcmc.org/)
国家自然保护区	2018	1:100万	矢量	ArcGIS Online(http://120.26.232.88:6080/arcgis/rest/services)

山区分布数据来自联合国环境规划署世界保护监测中心(UNEP-WCMC)于2000年建立全球山区分类标准所生成的中国山区空间分布图,该分类标准依据高程、坡度、起伏度以及山区位置将山区分为7类(图3a),本文将海拔大于4500 m的山区定义为极高山区。国家自然保护区数据来自ArcGIS Online中国自然保护区生态功能区在线地图,该数据集收集了中国截至2018年的1226个国家级自然保护区的核心区、缓冲区、实验区与一般保护区的空间范围(图3b)。为更好地表征人文自然交互性,本文将代表纯自然性的自然保护区所有范围与极高山区均排除在山区过渡性地理空间的识别范围之外。

2.3 研究方法

2.3.1 空间变率 地理要素的空间坡度体现出的是其空间变化过程。在均质空间中,地理要素的空间坡度为0,而在非均质的过渡性地理空间中,坡度随地理要素在各方向上的变化增大而增大。因此,空间坡度系数可以表征地理要素的空间变率及其过渡性与动态性,体现出空间过程中的地理不确定性。由此,本文使用空间坡度系数来测度地理要素空间变化的剧烈程度,并作为该要素的空间变率指数。计算公式如下^[37]:



注：基于自然资源部标准地图服务网站GS(2019)1815号标准地图制作,底图边界无修改。

图3 中国山区类型与国家自然保护区的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of the mountainous area categories and national nature reserves in China

$$En_S_{ij} = ATAN\left(\sqrt{(dz/dx)^2 + (dz/dy)^2}\right) \times \frac{180}{\pi} \quad (1)$$

$$(dz/dx, dz/dy) = \left(\sum_{n=1}^n cell_n \times \frac{4}{wght1} - \sum_{m=1}^m cell_m \times \frac{4}{wght2} \right) / (8 \times cellsize) \quad (2)$$

式中： En_S_{ij} 为第*i*个要素在空间*j*处空间变率指数（值域范围为 $0^\circ \sim 90^\circ$ ），其值越大表明要素在此处空间过渡越剧烈，不确定性越大； dz/dx 表示栅格像元*j*在一阶邻域内水平方向上的变化率， dz/dy 为像元*j*在一阶邻域内垂直方向上的变化率； $cell_n$ 、 $cell_m$ 为像元*j*一阶邻域内分别在*x*、*y*向上东西和南北向的像元值； $wght1$ 、 $wght2$ 分别为东西和南北向上有效像元的水平加权计数； $cellsize$ 为像元大小。

2.3.2 时间变率 本文利用线性回归表示时序过程，将时序上地理要素栅格相同位置的像元值归为一组样本矩阵，采用最小二乘法确定回归斜率与截距；据此计算时间点上的回归预测值，由预测值与观测值计算其样本残差及其占样本残差之和的比重（图4）。根据线性回归与信息熵的原理，观测值距离回归预测值距离越远，残差越大，地理事件的偶然性与异质性越强，其发生概率越小。

由此，得到时序上地理事件发生概率的数学表达式如下：

$$P_{ijt} = \frac{1}{W_{ijt}} \left/ \sum_{t=1}^t \frac{1}{W_{ijt}} \right., \quad \sum_t P_{ijt} = 1 \quad (3)$$

$$W_{ijt} = \frac{(V_{ijt} - R_{ijt})^2}{\sum_{t=1}^t (V_{ijt} - R_{ijt})^2}, \quad \sum_t W_{ijt} = 1 \quad (4)$$

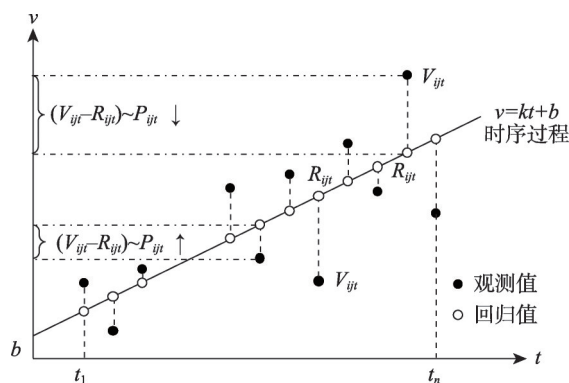


图4 基于线性回归的地理要素发生概率计算示意图
Fig. 4 Calculation schematic representation of geographical events occurrence probability based on linear regression

在计算地理事件发生概率的基础上,根据信息熵的概念,概率越小,熵值越大,其时间变率越强。本文定义时间变率系数表达式如下:

$$En_H_{ij}=-\sum_{t=1}^n P_{ijt} \times \ln P_{ijt}$$

(5)

式中: En_H_{ij} 为要素 i 在像元 j 处的信息熵,单位为比特 (Nat),其值表征地理要素 i 的时间变率; P_{ijt} 为要素 i 在像元 j 处于时间 t 时的发生概率; W_{ijt} 为此时样本残差量占回归残差量的比重; V_{ijt} 为要素 i 在像元 j 处于时间 t 时的像元值; R_{ijt} 为要素 i 在像元 j 处于时间 t 时的回归值。

2.3.3 地理时空变率 地理时空变率是包括人文自然多元要素的空间与时间变率,本文采用空间叠加法对时空变率进行复合,来确定山区过渡性地理空间的空间范围与地理时空变率指数。数学表达式如下:

$$En_j=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n En_{ij} \geq \max(En_{ij}) \times 25\%, j \in M_j, j \notin H_j, D_j \leq 4500$$

(6)

$$En_{ij}=\frac{1}{2}\left\{\left[En_H_{ij}/\max(En_H_{ij})\right]+\left[En_S_{ij}/\max(En_S_{ij})\right]\right\}$$

(7)

式中: En_j 为像元 j 处山区的地理时空变率指数; En_{ij} 为要素 i 在像元 j 处的时空变率值; M_j 表示山区范围; H_j 表示自然保护区范围; D_j 为像元 j 的高程。

2.3.4 土地利用强度 本文采用刘芳等提出的土地利用强度分类系统^[38],按照人类对自然系统的利用程度分为4级,并赋予分级指数(表2)。在此基础上,将原生30 m分辨率的土地利用类型栅格转换为分级指数,并逐年统计1 km²范围内各像元分级指数之和,以此作为土地利用强度指数栅格数据。

表2 基于Globe Land 30的土地利用强度分级指数
Tab. 2 Classification index of land use intensity based on Globe Land 30

强度类型	人工地类	半人工地类	半天然地类	天然地类
土地利用类型	人造地表	耕地	林地、草地、灌木地、水域、湿地	苔原、裸地、冰川和永久积雪
分级指数	4	3	2	1

2.3.5 地理探测器 地理探测器已被学界广泛证实在具有显著空间分异性的地理归因与分异特征解析方面具有稳健性与精确性^[39-41]。本文将地理探测器运用于山区过渡性地理空间的分异特征解析中,用以比较不同山区过渡性地理空间的关键驱动因子,分析不同驱动因子的驱动力谱。

3 结果与分析

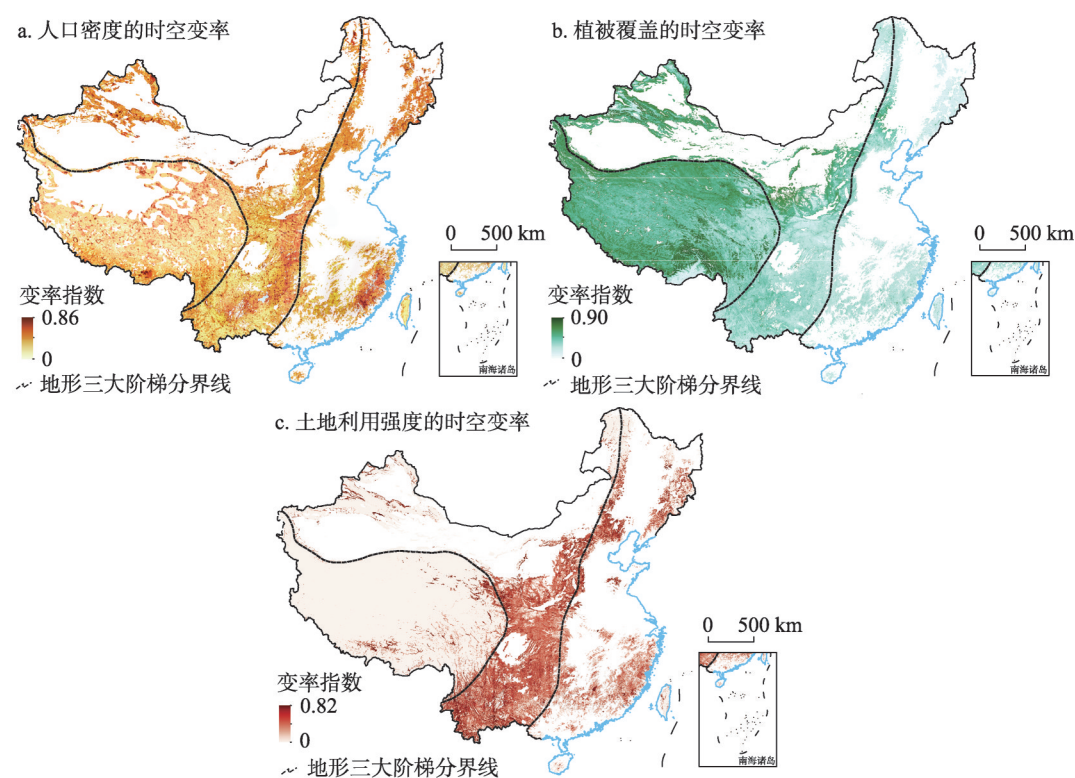
3.1 多元地理要素的时空变率

3.1.1 人口密度的时空变率 中国山区人口密度的时空变率整体上呈现东南高西北低的空间格局(图5a)。时空变率最高的区域主要位于江南丘陵、东北长白山等山区和山区城镇的周边,以及藏东南山区向藏北高原过渡的零星片区;山区人口密度时空变率的相对低值区主要分布在秦岭—巫山、云贵高原等山区,表明该区域人口分布的时空动态性不够明显。根据地形三大阶梯分区统计,结果显示第一、二、三阶梯人口密度时空变率均值分别为0.170、0.199和0.224,标准差分别为0.136、0.102、0.092。由此可以看出,中国

东部山区人口密度的时空变率高于中西部山区，这表明山区人口的时空变率同人口密度在一定程度上呈正相关关系，即山区人口密度越高，其人口的时空动态性越强。

3.1.2 植被覆盖的时空变率 中国植被覆盖度（NDVI）的时空变率呈现出明显的西高东低、北高南低的趋势（图5b）。NDVI的时空变率较高的山区分布于藏东南山区、横断山区、昆仑山、天山、阴山、贺兰山与黄土高原等区域，其中藏东南山区与横断山区NDVI的时空变率最高；相较之下，长白山区、秦岭—巫山、云贵高原及东南丘陵区NDVI时空变率相对较低，其时空动态性与分异度小于西北山区。第一、二、三阶梯山区NDVI的时空变率均值与标准差分别为0.376、0.317、0.218和0.111、0.112和0.062，这表明NDVI的时空变率明显同地形复杂度呈一定正相关关系，即地形起伏度越大，NDVI的动态性与时空格局的地理不确定性越强。

3.1.3 土地利用强度的时空变率 中国土地利用强度的时空变率呈现中间高、东西低的空间格局（图5c）。太行山—燕山、黄土高原与云贵高原等区域土地利用强度的时空变率最高，而青藏高原与西北山区除零星城镇区之外，整体较低，土地利用强度的动态性不明显。在东部山区、南方低山丘陵区及长白山部分地区其变率较高。统计第一、二、三阶梯土地利用强度时空变率均值和标准差分别为0.014、0.128、0.119和0.058、0.121、0.115，其中第二阶梯土地利用强度的动态变化度明显高于一、三阶梯。表明第二阶梯山区的土地开发利用度与干扰度的时空变率较高，域内土地利用时空格局处于快速动态变化过程中，其地理不确定性较强。



注：基于自然资源部标准地图服务网站GS(2019)1815号标准地图制作,底图边界无修改。

图5 中国山区人口密度、NDVI与土地利用强度的时空变率

Fig. 5 Spatiotemporal variability of population, NDVI and landuse intensity in mountainous areas of China

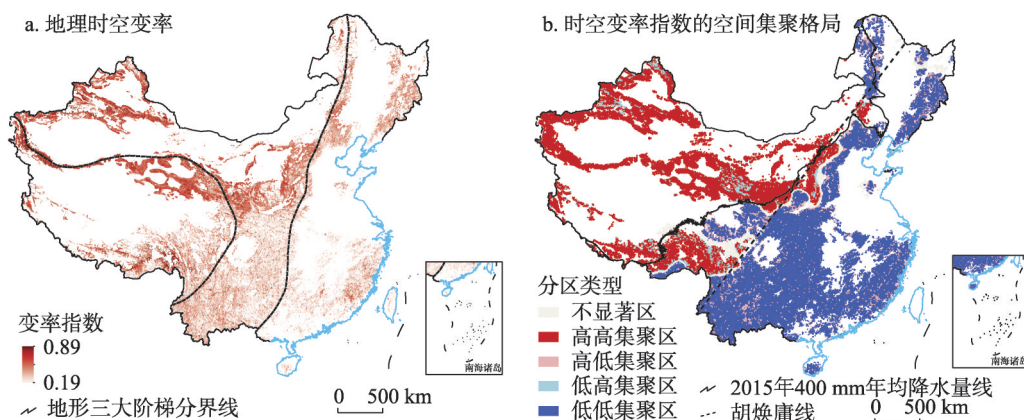
对比来看,人口密度、NDVI与土地利用强度的时空变率在三大阶梯间的空间格局是显著分异的,其分别在东部山区、西北部山区和中部山区的时空变率最为突出。三者间空间格局的宏观分异表明,单纯的人文或自然要素的时空变率无法完整地、全面地反映山区过渡性地理空间的人文自然交互性与地理不确定性,而是需要多元要素的时空变率来综合表征。

3.2 山区过渡性地理空间的识别与分类

3.2.1 人文自然交互的地理时空变率 根据本文研究框架(图2),最终得到中国山区过渡性地理空间与地理时空变率指数的空间分布(图6a)。结果显示,中国山区过渡性地理空间面积为 $238.32 \times 10^4 \text{ km}^2$,约占全国陆地国土面积的24.83%,主要分布于西南山区、东南丘陵、天山、祁连山、太行山与兴安岭及长白山等山区,空间格局上呈现南多北少、西多东少的格局。

就山区过渡性地理空间的地理时空变率而言,总体上呈现西北高东南低的格局(图6a),地理时空变率较高的山区主要分布在天山、昆仑山—祁连山、黄土高原、太行山以及藏东南山区,而在秦岭、巫山、云贵高原等山区城镇周边与东南丘陵山区存在地理时空变率局部高值区;相比之下,南岭山区、秦岭腹地、横断山区西北部 and 云贵高原中南部的地理时空变率相对较低。分阶梯对山区地理时空变率进行统计,第一、二、三阶梯均值和标准差分别为0.369、0.336、0.295和0.080、0.081和0.056,可以看出,山区地理时空变率从第一阶梯到第三阶梯呈逐渐递减趋势。对山区地理时空变率进行空间自相关分析,全局莫兰指数为0.640 ($p \leq 0.01$),表明存在显著的正向空间集聚性;局部空间自相关分析显示(图6b),山区地理时空变率高值区集聚于西北部山区和藏东南山区,东南部山区相对较低,这种空间分异性大致与400 mm等降水量线吻合,即与胡焕庸线的空间格局相一致,表明自然地理分异对山区过渡性地理空间人文自然交互性时空格局的根本性塑造作用。

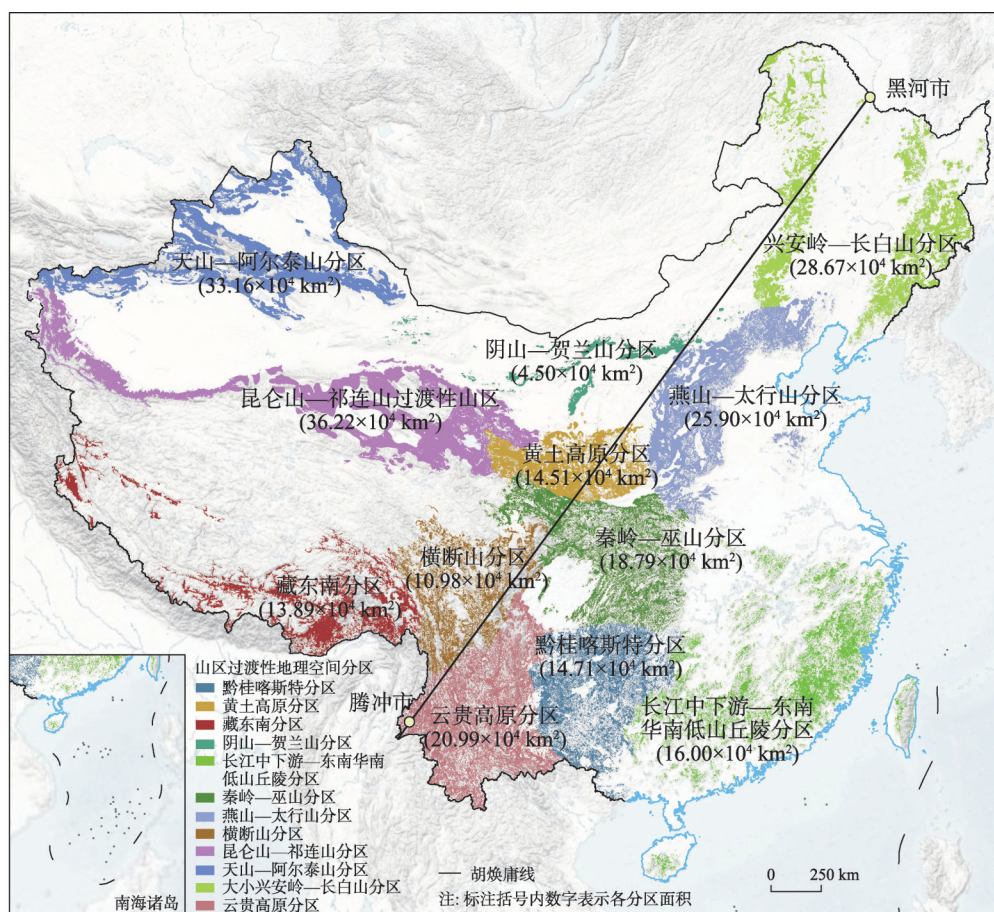
3.2.2 山区过渡性地理空间的分区 针对山区过渡性地理空间显著的分异性,本文在三大地形格局的基础上,结合地貌分区^[42]、山地空间范围^[43]、主要山脉与山峰位置^[44]和人文地理综合区划^[45],将中国山区过渡性地理空间分为12个分区(图7)。比较而言,本文分区与自然地域分区、人文地理分区等综合区划不同的是,分区方案主要针对山区过渡性地



注: 基于自然资源部标准地图服务网站GS(2019)1815号的标准地图制作,底图边界无修改。

图6 中国山区过渡性地理空间的地理时空变率及其空间格局

Fig. 6 The geographical spatiotemporal variability and its spatial pattern of MTGs in China



注: 基于自然资源部标准地图服务网站GS(2019)1815号的标准地图制作,底图边界无修改。

图7 中国山区过渡性地理空间的12个分区

Fig. 7 The spatial divisions of mountainous transitional geospace (MTG) in China

理空间的识别,并不完全覆盖全国山地或全国国土范围,更加强调与社会经济发展的关联。在分区方案中,地形格局与山区分布是首要考量因素,并兼顾地貌大区、植被类型区和人文地理大区的分布,突出人文自然复合特色,是对山区过渡性地理空间地域性特征的基本把握。在12个山区过渡性地理空间分区中,昆仑—祁连山分区面积最大,其次为天山—阿尔泰山分区,而内蒙古与宁夏的阴山—贺兰山分区面积最小,仅为昆仑—祁连山分区的九分之一,表明不同区域山区过渡性地理空间的分布差异性很大。

统计各分区的地理时空变率及人口、NDVI与土地利用强度的时空变率指数(图8),可以发现昆仑—祁连山分区的地理时空变率最高,均值达到0.399,其次为天山—阿尔泰山分区、藏东南分区、阴山—贺兰山分区,变率均值都在0.370以上。南方山区过渡性地理空间均值较低,其中黔桂喀斯特分区均值最低,仅为0.269;在人口密度的时空变率方面,均值最高的是阴山—贺兰山分区,均值最低的是云贵高原分区,但在各分区间差异较小,表明全国山区人口的时空过程是趋同的;在NDVI方面,北方大部山区过渡性地理空间的NDVI时空变率明显高于南方山区,表明北方山区NDVI的时空动态与不确定性高于南方,更容易受到人类活动与气候变化的影响;在表征人文自然交互性的土地利用强度时空变率上,均值最高的是燕山—太行山分区,均值最低的则是昆仑—祁连

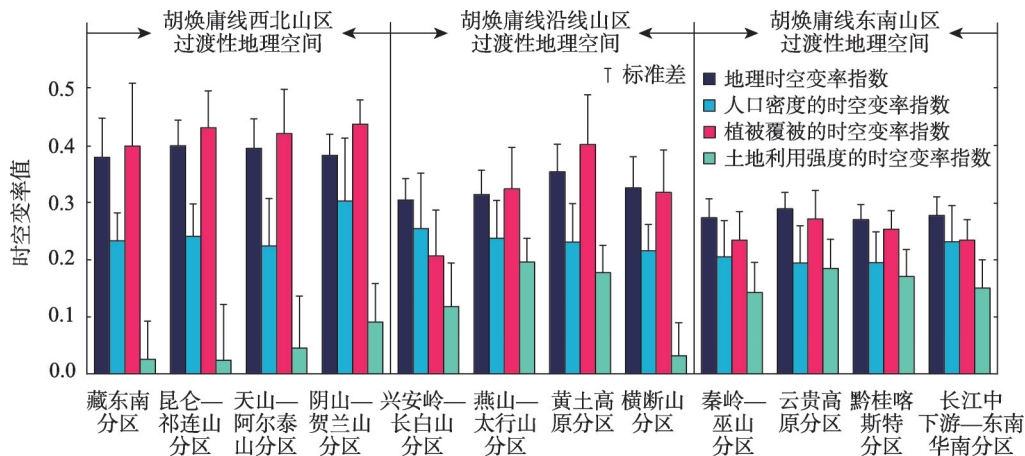


图8 不同分区的地理时空变率指数均值与标准差

Fig. 8 Mean and SD of geographical spatiotemporal variability index in each division of MTGs

山分区。在空间格局上，南方山区和北方的燕山—太行山与黄土高原分区的均值明显大于西北山区过渡性地理空间，这显示出在人类活动影响下，这部分山区在人文自然交互关系上具有更高的动态性。

对比各分区间的时空变率指数，可发现NDVI时空变率指数的分异性最强，其标准差达到0.087，其次是土地利用强度时空变率指数（0.067）与综合性的地理时空变率指数（0.049），最低的是人口密度的时空变率指数（0.029）。表明NDVI与土地利用强度在塑造山区地理不确定性的空间分异格局上起着主导作用，自然地理格局的塑造力总体是大于人文驱动力的。以胡焕庸线为界将各分区分为3类，并统计其各类时空变率指数。胡焕庸线西北山区过渡性地理空间在地理时空变率、人口与NDVI的时空变率指数上均明显大于胡焕庸线沿线与东南山区过渡性地理空间，自西北向东南呈递减趋势，其中NDVI的递减趋势更为显著。而在土地利用强度的时空变率上，呈现出自胡焕庸线东南向西北递减的趋势（0.162 > 0.130 > 0.046）。同时，NDVI与土地利用强度的时空变率在不同分区之间具有显著的负相关关系（ $r = -0.536$ ， $p \leq 0.01$ ）。表明NDVI不确定性较高的区域内土地利用强度相对稳定，而在NDVI时空动态相对稳定的山区，其土地利用强度却处在快速变化中。

3.3 山区过渡性地理空间的分异特征

3.3.1 山区过渡性地理空间驱动因子的选择 本文针对山区过渡性地理空间所呈现出来的人文自然交互性与区域分异性，从静态塑造与时空动态驱动两个视角分别选择基础地形、人文与自然驱动3类12个地理因子予以解析（表3）。① 将山区过渡性地理空间的地理时空变率及人口密度、NDVI与土地利用强度的时空变率4个指数作为待解析的因变量；② 将海拔、坡度、地形起伏度^[7]与地形位指数^[19]（窗口为100 km²）作为基础地形因子，表征基础地理格局的静态塑造作用；利用变异系数和栅格坡度分析法，分别计算出GDP、夜间灯光、年降水量和年均温的时间变化性系数与空间坡度（多年均值）的空间栅格数值，得到表征人文和自然要素的时间变化性与空间分异性的8个因子；③ 建立起覆盖全国的蜂窝格网（考虑到计算量与栅格像元大小及噪声值，每个格网面积为100 km²），逐格网提取山区过渡性地理空间的各类变率指数及各因子栅格的均值，得到包括4个因变量与12个自变量的山区过渡性地理空间时空变率值及解析因子的数据集，以此作为地理探测器的输入数据。

表3 山区过渡性地理空间地理不确定性解析驱动因子的选择

Tab. 3 The selection of driving factors for the geographical uncertainty of MTGs

类别		名称	数据类型	变量符号
因变量		山区过渡性地理空间的地理变率	空间栅格(1 km)	<i>En_Mountain</i>
		山区过渡性地理空间人口时空变率	空间栅格(1 km)	<i>En_Pop</i>
		山区过渡性地理空间NDVI时空变率	空间栅格(1 km)	<i>En_NDVI</i>
		山区过渡性地理空间土地利用强度时空变率	空间栅格(1 km)	<i>En_Land</i>
静态塑造因子	基础地理	海拔	空间栅格(1 km)	<i>DEM</i>
		地形起伏度	空间栅格(1 km)	<i>DEM_Relief</i>
		地形坡度	空间栅格(1 km)	<i>DEM_Slope</i>
		地形位指数	空间栅格(1 km)	<i>Topography_Index</i>
动态驱动因子	人文驱动	GDP时间变化性	空间栅格(1 km)	<i>CV_GDP</i>
		夜间灯光时间变化性	空间栅格(1 km)	<i>CV_Night</i>
		GDP空间分异性	空间栅格(1 km)	<i>Slope_GDP</i>
		夜间灯光空间分异性	空间栅格(1 km)	<i>Slope_Night</i>
	自然驱动	年降水量时间变化性	空间栅格(1 km)	<i>CV_Per</i>
		年均温时间变化性	空间栅格(1 km)	<i>CV_Tem</i>
		年降水量空间分异性	空间栅格(1 km)	<i>Slope_Per</i>
		年均温空间分异性	空间栅格(1 km)	<i>Slope_Tem</i>

3.3.2 山区过渡性地理空间的整体驱动力谱 基于地理探测器得到基础地形因子与人文自然时空驱动因子对各类变率指数的解析力及其显著性（表4）。可以发现，基础地形因子与人文自然时空驱动因子均对土地利用强度的时空变率解析力最强（平均解析力0.125），且显著性最高。相较之下，人文自然驱动类因子对地理时空变率与人口时空变率的解析力较低。横向对比来看，空间驱动因子对各类变率指数的解析力最高（0.089），且显著高于时间驱动因子（0.077）与基础地形因子（0.078），尤其是在对人口与土地利用的时空变率解析上。对比各类别因子的平均解析力，可以发现，人文驱动因子对人口与土地利用的时空变率解析力最强，尤其是对人口密度时空变率的解析。在对综合指数地理时空变率的解析方面，基础地形因子的解析力大于人文自然驱动因子，但三者间的差距很小。

表4 各因子对山区过渡性地理空间各类变率指数的解析力

Tab. 4 The analytical power of driving factors on spatiotemporal variability indices in MTGs

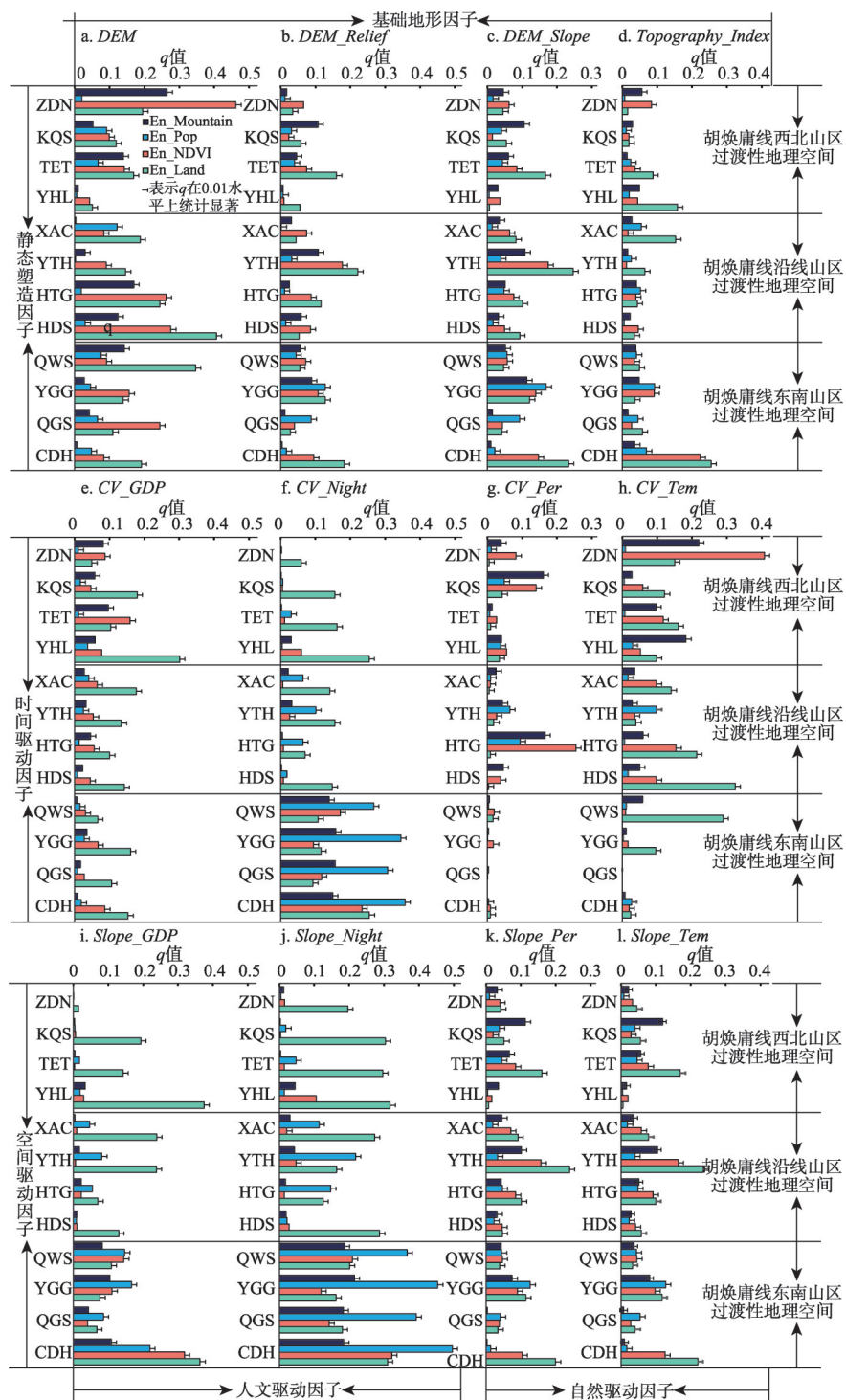
因子	基础地形因子				时间驱动因子				空间驱动因子				Mean
	<i>DEM</i>	<i>DEM_Relief</i>	<i>DEM_Slope</i>	<i>Topography_Index</i>	<i>CV_GDP</i>	<i>CV_Night</i>	<i>CV_Per</i>	<i>CV_Tem</i>	<i>Slope_GDP</i>	<i>Slope_Night</i>	<i>Slope_Per</i>	<i>Slope_Tem</i>	
<i>En_Mountain</i>	0.084*	0.047*	0.055*	0.033	0.041	0.058*	0.046	0.065*	0.036	0.079*	0.050*	0.048	0.054
<i>En_Pop</i>	0.049*	0.038	0.049*	0.038	0.020	0.131*	0.028	0.019	0.071*	0.192*	0.038	0.040*	0.059
<i>En_NDVI</i>	0.186*	0.071*	0.076*	0.061*	0.069*	0.062*	0.059*	0.105*	0.058*	0.087*	0.065*	0.065*	0.080
<i>En_Land</i>	0.185*	0.093*	0.101*	0.081*	0.156*	0.143*	0.014	0.139*	0.168*	0.234*	0.092*	0.094*	0.125
Mean	0.126	0.062	0.070	0.053	0.072	0.099	0.037	0.082	0.083	0.148	0.061	0.062	/

注：*表示解析力在0.01水平上统计显著。

分类来看(表4),海拔对综合指数地理变率的解析力最强,时间驱动因子对其解析力最弱,这表明山区过渡性地理空间在地理时空变率上,受到基础地形因子的塑造力更强,并在空间过程上的动态性高于时间过程;对人口的时空变率而言,夜间灯光时间变化性(CV_Nigh)对其解析力最强,且远高于其他因子,这显示出人文经济活动对山区人口的时空动态性具有极强的驱动力;对NDVI时空变率解析力最强的因子为海拔,此外其余因子均对其具有显著解析力,且各因子解析力差异较小,这说明基础地形、人文经济活动与气候变化均对山区NDVI的时空动态具有显著影响,且地形仍是决定性要素;在土地利用时空变率方面,夜间灯光时间变化性(CV_Nigh)具有最强解析力,且人文要素的时空驱动因子及地形因子均对其表现出显著的解析力。除年降水量时间变化性(CV_Per)外,其余因子对土地利用时空变率解析力均较显著,且明显高于对另三类变率指数的解析力。表明土地利用强度的时空变率成为山区过渡性地理空间地理不确定性的主要表现形式,人文自然要素的时空动态变化通过驱动土地利用强度的时空演变,进而作用于山区过渡性地理空间人地关系的时空演变过程。

3.3.3 山区过渡性地理空间的分区驱动力谱 在基础地形因子方面(图9a~9d),海拔在藏东南分区、横断山分区和秦岭—巫山分区对NDVI与土地利用强度的时空变率解析力较高,而在阴山—贺兰山分区解析力较低;地形起伏度与坡度均在燕山—太行山分区、云贵高原分区与长江中下游—东南华南低山丘陵区解析力较高;而地形位指数则在长江中下游—东南华南低山丘陵分区具有较高解析力,尤其是对NDVI与土地利用强度的时空变率解析上。整体上,基础地形因子中,海拔在各分区的解析力最高,而地形起伏度、坡度与地形位指数仅在部分地形较为破碎的分区对NDVI与土地利用强度的时空变率具有较高解析力。表明海拔是塑造山区整体过渡性的关键因子,而在地形破碎化的山区,NDVI与土地利用强度的时空动态性受各类地形指数的显著影响,山区局域地形越破碎与复杂,其NDVI与土地利用强度的不确定性特征越明显。

在时间驱动因子中(图9e~9h),除GDP时间变化性(CV_GDP)之外,其余因子在各分区的解析力均有明显的分异性。具体来看,GDP时间变化性(CV_GDP)在各分区对土地利用强度时空变率具有较高解析力,尤其是在阴山—贺兰山分区。而在天山—阿尔泰山分区则对NDVI时空变率解析力最高,表明这些山区经济活动对土地利用强度与NDVI时空变化的影响很敏感;夜间灯光时间变化性(CV_Night)在胡焕庸线东南山区过渡性地理空间对各类变率指数的解析力明显高于胡焕庸线沿线及西北山区过渡性地理空间,尤其是在胡焕庸线东南侧对人口密度时空变率具有极高解析力,这显示出人文要素时间变化对胡焕庸线东南山区过渡性的巨大驱动力,并深刻影响了这类山区过渡性地理空间人文自然交互性的时空演变。值得注意的是,夜间灯光时间变化性(CV_Night)在胡焕庸线西北山区过渡性地理空间仅对土地利用时空变率具有较高解析力,这反映出西北山区过渡性地理空间的土地利用变化在人文活动下具有高度地理不确定性与明显的过渡性;不同的是,自然要素的时间变化因子年降水量时间变化性(CV_Per)和年均温时间变化性(CV_Tem)在胡焕庸线沿线与西北山区过渡性地理空间的解析力明显高于东南山区过渡性地理空间,尤其是年均温时间变化性(CV_Tem)在藏东南分区、黄土高原分区、横断山分区与秦岭—巫山等分区具有较高解析力。从变率类别来看,年降水量时间变化性(CV_Per)和年均温时间变化性(CV_Tem)主要对地理时空变率、NDVI与土地利用强度的时空变率解析力较高,而对人口时空变率的解析力微弱。这说明气温与降水的时间变化主要驱动NDVI与土地利用强度的时空动态演变,且这种影响主要集中于



注: 藏东南分区(ZDN)、昆仑—祁连山分区(KQS)、天山—阿尔泰山分区(TET)、阴山—贺兰山分区(YHL)、兴安岭—长白山分区(XAC)、燕山—太行山分区(YTH)、黄土高原分区(HTG)、横断山分区(HDS)、秦岭—巫山分区(QWS)、云贵高原分区(YGG)、黔桂喀斯特分区(QGS)、长江中下游—东南华南低山丘陵分区(CDH)。

图9 不同山区过渡性地理空间的驱动力谱

Fig. 9 The driving forces spectrum of humanistic and natural factors in each division of MTGs

中国气候类型区分界处的山区与西北山区,揭示出这类山区过渡性地理空间对气候变化的敏感性。

在空间驱动因子中(图9i~9l),人文类因子在各分区解析力的分异性强于自然类因子。具体而言,GDP空间分异性(*Slope_GDP*)与夜间灯光空间分异性(*Slope_Night*)在胡焕庸线东南山区过渡性地理空间对各类时空变率指数具有更大的解析力,其中夜间灯光空间分异性(*Slope_Night*)对地理时空变率、人口与NDVI的时空变率解析力远高于胡焕庸线沿线与西北山区过渡性地理空间,即人文要素对中国东南山区过渡性地理空间人文自然交互性的驱动作用大于西北山区过渡性地理空间。然而,GDP空间分异性(*Slope_GDP*)与夜间灯光空间分异性(*Slope_Night*)在胡焕庸线沿线与西北山区过渡性地理空间对土地利用的时空变率具有较高解析力,这说明人文活动的空间分异性对西北山区过渡性地理空间的土地利用变化影响显著;自然因子方面,年降水量空间分异性(*Slope_Per*)和年均温空间分异性(*Slope_Tem*)对天山—阿尔泰山分区、燕山—太行山分区与长江中下游—东南华南低山丘陵分区的NDVI与土地利用强度的时空变率具有一定解析力。但从整体而言,自然因子的空间分异性对各类变率指数的解析力相对较小且在各分区变化不大,即自然要素的空间分异性对山区过渡性地理空间动态演变的驱动作用总体上弱于人文要素。

综上所述,海拔与夜间灯光空间分异性(*Slope_Night*)是大多数山区过渡性地理空间解析力最大的因子。对人口与土地利用时空变率指数而言,6个分区中,夜间灯光空间分异性(*Slope_Night*)是其解析力最大的因子。由此可见,基础地形塑造与人文活动是山区过渡性地理空间人文自然交互演变的关键主导因子与主要驱动力。整体上,各因子在云贵高原分区对综合指数地理时空变率和人口时空变率指数的平均解析力最高(0.080, 0.140),在长江中下游—东南华南低山丘陵分区,各因子对NDVI与土地利用的时空变率指数平均解析力最高(0.147, 0.199)。

4 结论与讨论

4.1 结论

本文遵循地理不确定性的概念,构建了地理时空变率指数,以人口密度、植被覆盖与土地利用强度作为人文自然交互的表征指标,识别出中国山区过渡性地理空间地域特征与分布格局,对其进行分区,并运用地理探测器从基础地形、人文自然驱动的角度探测各因子对其地理时空变率的解析力,进而阐释山区过渡性地理空间人文自然交互性的驱动力谱和分异特征。主要结论如下:

(1) 中国山区过渡性地理空间是极为重要的国土空间,也是空间高质量发展与人地关系协调的关键区域,其总面积为 $238.32 \times 10^4 \text{ km}^2$ (约占全国陆表面积的24.83%),主要分布于中西部山区,其中过渡性特征最明显的山区过渡性地理空间分布于天山、昆仑—祁连山、黄土高原与太行山等地。山区过渡性地理空间的时空变率从第一阶梯到第三阶梯呈递减趋势,即东南山区过渡性地理空间的不确定性低于西北山区。

(2) 中国山区过渡性地理空间可分为12个分区。其中昆仑—祁连山分区面积最大,阴山—贺兰山分区面积最小。相较而言,NDVI时空变率指数在各分区的分异性最大,其次是土地利用强度时空变率指数,而人口密度的时空变率指数分异性相对较小,表明NDVI与土地利用强度在塑造山区过渡性地理空间不确定性的分异格局上起着主导作用,自然地理格局的塑造力总体上大于人文力。

(3) 从静态塑造与时空动态驱动的视角解析山区过渡性地理空间的驱动力谱,发现人文驱动因子对人口与土地利用的时空变率解析力最强,基础地形因子对NDVI时空变率与综合指数地理时空变率指数的解析力最强;在不同指数间,各因子对土地利用强度的时空变率均具有最强解析力;在不同因子间,海拔是塑造山区过渡性地理空间的关键因子,而夜间灯光空间分异性对山区过渡性地理空间具有很强的表征性。

(4) 不同类别因子对山区过渡性地理空间的塑造性分异明显。基础地形因子对破碎化山区的地理时空变率解析力更高;人文要素的时间与空间动态过程对东南山区过渡性地理空间的解析力最强;气温与降水的时间变化性和人文活动的空间分异性对西北山区过渡性地理空间的驱动力最高,但后者主要作用于土地利用强度的地理不确定性上。

4.2 讨论

本文重在刻画人文自然要素交互与时空动态过程下的山区过渡性地理空间特性,有益于促进过渡性地理空间研究从单一性与静态性向交互性与时空动态性发展。在理论上,基于时空变率指数的山区过渡性地理空间识别与表征,能够有机地将多元人文自然要素的地理不确定性编码到区域特征的识别、量值表征与区划中,这对于从人文自然交互视角认知人地关系的关联性、嵌套性及其系统性与综合性具有重要科学意义;在方法上,最具探索的是,本文尝试将线性回归引入到地理要素的时间过程模拟中,并用回归残差来表示地理要素时间过程中的波动性与不确定性,将此作为地理要素的发生概率,这进而为观测与模拟地理要素时间过程的平稳性与可预测性提供了参量。相比于使用固定均值与期望^[46],本文所构建的方法将地理要素的期望视为随时间而变化的函数过程,这可以更好地模拟变化环境中人文自然要素宏观趋势之下的变异性与不确定性;在模型上,本文同时引入坡度系数与时间信息熵,基于时空变率的视角定量表征了地理过程的不确定性,将地理变化转换为地理过程,从而实现将多元要素的时空动态性编码到区域特性的表达中,这对研究山区地理空间的不确定性、弹性与稳定性、多样性与复杂性提供了定量分析工具。

山区过渡性地理空间作为国土空间中人地关系敏感性、复杂性与不确定性突出的区域,对其格局与过程的研究还需进一步加深。在指示要素选择上,本文仅选用人口、植被与土地利用3个典型表征要素予以刻画,而表征复杂人文活动与变化环境的人文自然要素也应纳入到研究框架中,以提高交互性识别与过渡性刻画的指示性与综合性;在时间尺度上,时空动态性是识别与表征过渡性与不确定性的关键路径,更长时间序列的数据有助于提升模型拟合的稳健性,且不同时间序列及未来情景下时空动态研究对于山区过渡性地理空间的识别与表征、时空演变、动态模拟至关重要,有利于认知山区过渡性地理空间的演变规律与人文自然复合机理;在空间尺度上,过渡性地理空间具有尺度依赖性,尤其是在山区。不同尺度下的过渡性地理空间具有关联性与嵌套性,其间的级联效应能够较好地指示国土空间功能的传递性及功能传递间的刚性约束与弹性权衡;在模型方法上,多元地理数据的复合应是未来模型改进的重要方向。在大区域研究中,为体现区域人文自然复合的分异性,不同区域内多元地理数据的复合权重应有所不同;在新型城镇化和乡村振兴背景下,山区过渡性地理空间的高质量发展面临诸多挑战,空间权衡问题复杂,人地关系协调难度大。因此,科学而深入地解析和认知这一特殊的国土空间本质与演变规律及人文自然交互机理亟待加强,这不仅可为区域地理学综合研究提供新的探索方向,其研究成果还可为山区国土空间开发格局的优化、促进其可持续发展提供科学认知与决策依据。

参考文献(References)

- [1] Deng Wei, Zhang Shaoyao, Zhang Hao, et al. Transitional geospace from the perspective of human-nature coupling: Concept, connotations, attributes, and the research framework. *Geographical Research*, 2020, 39(4): 761-771. [邓伟, 张少尧, 张昊, 等. 人文自然耦合视角下过渡性地理空间概念、内涵与属性和研究框架. *地理研究*, 2020, 39(4): 761-771.]
- [2] Vizzari M, Hilal M, Sigura M, et al. Urban-rural-natural gradient analysis with CORINE data: An application to the metropolitan France. *Landscape and Urban Planning*, 2018, 171(5): 18-29.
- [3] Huang Qi, Wang Hongzhi, Gu Jiang, et al. The determination of urban-rural ecotones from the perspective of urban and rural landscape complexity. *Economic Geography*, 2019, 39(10): 71-77. [黄琦, 王宏志, 顾江, 等. 城乡景观复杂度视角下的城乡交错带界限确定: 以武汉市为例. *经济地理*, 2019, 39(10): 71-77.]
- [4] Liu Honglai, Wang Yimeng, Dou Xiao, et al. Progress and perspective of agro-pasturage ecotone. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(8): 4420-4425. [刘洪来, 王艺萌, 窦潇, 等. 农牧交错带研究进展. *生态学报*, 2009, 29(8): 4420-4425.]
- [5] Fan Zemeng. Spatial identification and scenario simulation of ecotone distribution in China. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(3): 626-644. [范泽孟. 中国生态过渡带分布的空间识别及情景模拟. *地理学报*, 2021, 76(3): 626-644.]
- [6] Zhang Jingjing, Zhu Wenbo, Zhao Fang, et al. Spatial variations of terrain and their impacts on landscape patterns in the transition zone from mountains to plains: A case study of Qihe River basin in the Taihang Mountains. *Science China: Terrae*, 2018, 48(4): 476-486. [张静静, 朱文博, 赵芳, 等. 山地平原过渡带地形起伏特征及其对景观格局的影响: 以太行山淇河流域为例. *中国科学: 地球科学*, 2018, 48(4): 476-486.]
- [7] Jing Bo, Li Tongsheng, Wen Boqing, et al. Population-economy spatial pattern and impact mechanism of the Qinba mountain area based on topographic factors. *Scientia Geographica Sinica*, 2020, 40(5): 793-803. [敬博, 李同昇, 温伯清, 等. 基于地形因素的秦巴山区人口: 经济空间格局及其影响机制研究. *地理科学*, 2020, 40(5): 793-803.]
- [8] Feng Zhiming, Tang Yan, Yang Yanzhao, et al. The relief degree of land surface in China and its correlation with population distribution. *Acta Geographica Sinica*, 2007, 62(10): 1073-1082. [封志明, 唐焰, 杨艳昭, 等. 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.]
- [9] Yao Yonghui, Kou Zhixiang, Hu Yufan, et al. Spatial distribution patterns of *Pinus tabulaeformis* forest and *Pinus massoniana* forest in Qinling-Daba Mountains and the boundary of subtropical and warm temperate zones. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(11): 2298-2306. [姚永慧, 寇志翔, 胡宇凡, 等. 秦巴山区马尾松林和油松林的空间分布及亚热带与暖温带界线划分. *地理学报*, 2020, 75(11): 2298-2306.]
- [10] Liu Yang, Li Chengzhi, Liu Zhihui, et al. Assessment of spatio-temporal variations in vegetation cover in Xinjiang from 1982 to 2013 based on GIMMS-NDVI. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(19): 6198-6208. [刘洋, 李诚志, 刘志辉, 等. 1982—2013年基于GIMMS-NDVI的新疆植被覆盖时空变化. *生态学报*, 2016, 36(19): 6198-6208.]
- [11] Liu Xiaona, Liu Chunlan, Chen Long, et al. Gradient effects and ecological zoning of ecosystem services in transition zone of Beijing Bay. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(12): 276-285. [刘晓娜, 刘春兰, 陈龙, 等. 北京湾过渡带生态系统服务梯度效应分析及生态分区. *农业工程学报*, 2020, 36(12): 276-285.]
- [12] Camac J S, Umbers K D L, Morgan J W, et al. Predicting species and community responses to global change using structured expert judgement: An Australian mountain ecosystems case study. *Global Change Biology*, 2021, 27(18): 4420-4434.
- [13] Berauer B J, Wilfahrt P A, Schuchardt M A, et al. High land-use intensity diminishes stability of forage provision of mountain pastures under future climate variability. *Agronomy*, 2021, 11(5): 910. DOI: 10.3390/agronomy11050910.
- [14] Zhang Jun, Zheng Xungang. Effect of rural ageing labor force on land transfer: Land complex or labor capability restriction dominates? Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2020, 29(4): 997-1004. [张军, 郑循刚. 劳动力老龄化对农村土地流转的影响: 土地情结与劳动能力限制谁占主导? *长江流域资源与环境*, 2020, 29(4): 997-1004.]
- [15] Li Shiji, Li Xiubin, Tan Minghong. Impacts of rural-urban migration on vegetation cover in ecologically fragile areas: Taking Inner Mongolia as a case. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(10): 1622-1631. [李仕冀, 李秀彬, 谈明洪. 乡村人口迁出对生态脆弱地区植被覆盖的影响: 以内蒙古自治区为例. *地理学报*, 2015, 70(10): 1622-1631.]
- [16] Niu Zihao, Zhou Zhongfa, Zhu Changli, et al. Rurality spatial distribution and types of rural development in karst mountains: A case of Panzhou city in Guizhou province. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, 28(3): 316-324. [牛子浩, 周忠发, 朱昌丽, 等. 喀斯特山区乡村性空间分异及发展类型: 以贵州省盘州市为例. *水土保持研究*, 2021, 28(3): 316-324.]
- [17] Yang J Y, Yang J, Luo X Y, et al. Impacts by expansion of human settlements on nature reserves in China. *Journal of*

- Environmental Management, 2019, 248(10): 109233. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.07.004.
- [18] Yang Bin, Wang Zhanqi, Yao Xiaowei, et al. Terrain gradient effect and spatial structure characteristics of land use in mountain areas of northwestern Hubei province. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, 28(2): 313-321. [杨斌, 王占岐, 姚小微, 等. 鄂西北山区土地利用的地形梯度效应与空间结构特征. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(2): 313-321.]
- [19] Jian Ping, Li Yangbing, Wang Quan. Analysis of the spatial distribution pattern of land use in typical peak-cluster depression areas based on terrain gradient. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2020, 29(5): 1128-1139. [简萍, 李阳兵, 王权. 基于地形梯度的典型峰丛洼地区土地利用空间分布格局分析. *长江流域资源与环境*, 2020, 29(5): 1128-1139.]
- [20] Peng Y, Mi K, Qing F T, et al. Identification of the main factors determining landscape metrics in semi-arid agro-pastoral ecotone. *Journal of Arid Environments*, 2016, 124(1): 249-256.
- [21] Wu S Y, Liang Z, Li S C. Relationships between urban development level and urban vegetation states: A global perspective. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2019, 38(2): 215-222.
- [22] Wu X T, Wei Y P, Fu B J, et al. Evolution and effects of the social-ecological system over a millennium in China's Loess Plateau. *Science Advances*, 2020, 6(41): eabc0276. DOI: 10.1126/sciadv.abc0276.
- [23] Zhou Peng, Deng Wei, Peng Li, et al. Spatio-temporal coupling characteristic of water-land elements and its cause in typical mountains. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(11): 2273-2287. [周鹏, 邓伟, 彭立, 等. 典型山地水土要素时空耦合特征及其成因. *地理学报*, 2019, 74(11): 2273-2287.]
- [24] Zhao Weiqing, Li Jingwei, Chu Lin, et al. Analysis of spatial and temporal variations in vegetation index and its driving force in Hubei province in the last 10 years. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(20): 7722-7736. [赵维清, 李经纬, 褚琳, 等. 近10年湖北省植被指数时空变化特征及其驱动力. *生态学报*, 2019, 39(20): 7722-7736.]
- [25] Lin T, Sun C G, Li X H, et al. Spatial pattern of urban functional landscapes along an urban-rural gradient: A case study in Xiamen city, China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2016, 46(4): 22-30.
- [26] Zhu Z Q, Kong X S, Li Y J. Identifying the static and dynamic relationships between rural population and settlements in Jiangsu province, China. *Chinese Geographical Science*, 2020, 30(5): 810-823.
- [27] Liu H Y, Jiao F S, Yin J Q, et al. Nonlinear relationship of vegetation greening with nature and human factors and its forecast: A case study of Southwest China. *Ecological Indicators*, 2020, 111(4): 106009. DOI: 10.1016/j.ecolind.2019.106009.
- [28] Diaz D, Moore F. Quantifying the economic risks of climate change. *Nature Climate Change*, 2017, 7(11): 774-782.
- [29] Xu X J, Liu H Y, Jiao F S, et al. Nonlinear relationship of greening and shifts from greening to browning in vegetation with nature and human factors along the silk road economic belt. *Science of the Total Environment*, 2021, 766(4): 142553. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.142553.
- [30] Li Shengfa, Li Xiubin. Economic characteristics and the mechanism of farmland marginalization in mountainous areas of China. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(5): 803-817. [李升发, 李秀彬. 中国山区耕地利用边际化表现及其机理. *地理学报*, 2018, 73(5): 803-817.]
- [31] Zou Lilin, Liu Yansui, Wang Yongsheng. Research progress and prospect of land-use conflicts in China. *Progress in Geography*, 2020, 39(2): 298-309. [邹利林, 刘彦随, 王永生. 中国土地利用冲突研究进展. *地理科学进展*, 2020, 39(2): 298-309.]
- [32] Li Xiubin. Explanation of land use changes. *Progress in Geography*, 2002, 21(3): 195-203. [李秀彬. 土地利用变化的解释. *地理科学进展*, 2002, 21(3): 195-203.]
- [33] Ge D Z, Zhou G P, Qiao W F, et al. Land use transition and rural spatial governance: Mechanism, framework and perspectives. *Journal of Geographical Sciences*, 2020, 30(8): 1325-1340.
- [34] Yang Xue, Zhang Wenzhong. Combining natural and human elements to evaluate regional human settlements quality based on raster data: A case study in Beijing-Tianjin-Hebei region. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(12): 2141-2154. [杨雪, 张文忠. 基于栅格的区域人居自然和人文环境质量综合评价: 以京津冀地区为例. *地理学报*, 2016, 71(12): 2141-2154.]
- [35] Liu Jiyan, Ning Jia, Kuang Wenhui, et al. Spatio-temporal patterns and characteristics of land-use change in China during 2010-2015. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(5): 789-802. [刘纪远, 宁佳, 匡文慧, 等. 2010—2015年中国土地利用变化的时空格局与新特征. *地理学报*, 2018, 73(5): 789-802.]
- [36] Yu Qiangyi, Chen Youqi, Xu Xinguo. Concept discrimination on "Rural-Urban Fringe" in land use science. *China Land*

- Science, 2010, 24(8): 46-51. [余强毅, 陈佑启, 许新国. 土地利用科学中的“城乡交错带”概念辨析. 中国土地科学, 2010, 24(8): 46-51.]
- [37] Zhao L S, Hou R, Wu F Q. Effect of DEM grid size on microrelief indexes estimation for sloping lands after reservoir tillage. *Soil and Tillage Research*, 2020, 196(2): 104451. DOI: 10.1016/j.still.2019.104451.
- [38] Liu Fang, Yan Huimin, Liu Jiyan, et al. Spatial pattern of land use intensity in China in 2000. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(7): 1130-1143. [刘芳, 闫慧敏, 刘纪远, 等. 21世纪初中国土地利用强度的空间分布格局. 地理学报, 2016, 71(7): 1130-1143.]
- [39] Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: Principle and prospective. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 116-134. [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.]
- [40] Wang J F, Li X H, Christakos G, et al. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun region, China. *International Journal of Geographical Information Science*, 2010, 24(1): 107-127.
- [41] Wang J F, Zhang T L, Fu B J. A measure of spatial stratified heterogeneity. *Ecological Indicators*, 2016, 67(8): 250-256.
- [42] Cheng Weiming, Zhou Chenghu, Li Bingyuan, et al. Geomorphological regionalization theory system and division methodology of China. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(5): 839-856. [程维明, 周成虎, 李炳元, 等. 中国地貌区划理论分区体系研究. 地理学报, 2019, 74(5): 839-856.]
- [43] Nan Xi, Li Ainong, Chen Yu, et al. Design and compilation of digital mountain map of China (1:6700000) in vertical layout. *Remote Sensing Technology and Application*, 2016, 31(3): 451-458. [南希, 李爱农, 陈昱, 等. 竖版中国数字山地图(1:670万)的设计与编制. 遥感技术与应用, 2016, 31(3): 451-458.]
- [44] Wang Xiangping, Wang Zhiheng, Fang Jingyun. Mountain ranges and peaks in China. *Biodiversity Science*, 2004, 12(1): 206-212. [王襄平, 王志恒, 方精云. 中国的主要山脉和山峰. 生物多样性, 2004, 12(1): 206-212.]
- [45] Fang Chuanglin, Liu Haimeng, Luo Kui, et al. Comprehensive regionalization of human geography in China. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(2): 179-196. [方创琳, 刘海猛, 罗奎, 等. 中国人文地理综合区划. 地理学报, 2017, 72(2): 179-196.]
- [46] Song Yang, Zhu Daolin, Yeung Godfrey, et al. Spatio-temporal evolution and driving mechanism of urban land use structure with the context of urban shrinkage: Evidence from Northeast China. *Geographical Research*, 2021, 40(5): 1387-1403. [宋洋, 朱道林, Yeung Godfrey, 等. 收缩情境下城市用地结构时空格局演变及动力机制: 以中国东北地区为例. 地理研究, 2021, 40(5): 1387-1403.]

Identification and differentiation of human-nature interaction in mountainous transitional geospace of China

ZHANG Shaoyao^{1,4}, DENG Wei^{1,3,4}, HU Maogui², ZHANG Hao³,
WANG Zhanyun³, PENG Li^{1,4}

(1. College of Geography and Resources Science, Sichuan Normal University, Chengdu 610101, China;
2. State Key Laboratory of Resources and Environment Information System, Institute of Geographic Sciences and
Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 3. Institute of Mountain Hazards and Environment,
CAS, Chengdu 610041, China; 4. Sustainable Development Research Center of Resources and Environment in
Western Sichuan, Sichuan Normal University, Chengdu 610101, China)

Abstract: Regionalization, spatiotemporal differentiation and uncertainty are featured in the process of humanistic-natural interaction in Chinese mountain areas, making them typical mountainous transitional geospace (MTGs). Quantitative identification of MTGs types and consequent differentiation characteristics analysis can build a solid decision-making foundation for high-quality development of land space in mountainous areas under the background of rural revitalization strategy of China. This study introduced a spatiotemporal variability index based on the concept of geographic uncertainty, which was designed to work out identification, delineation and division of MTGs, and then it used the Geodetector to analyze the driving factors spectrum of the geographic spatiotemporal variability in each division of MTGs. It concludes the following points: (1) The total area of MTGs was $238.32 \times 10^4 \text{ km}^2$ (about 1/4 of the land surface area of China), with MTGs variability index in a decreasing trend from the First Gradient Terrain to the Third Gradient Terrain of China. (2) MTGs in China could be divided into 12 segmentations, of which the area of the Kunlun-Qilian Mountains subzone is the largest. (3) Humanistic driving factors had the strongest analytical power on spatiotemporal variability of population density and land-use intensity. The analytical power of the basic topographic variables, such as *DEM*, *DEM_Relief*, *DEM_Slope* and *Topography* index, had significant analytical effect on the spatiotemporal variability of vegetation coverage (NDVI) and MTGs geographic uncertainty, and the analytical driving force of altitude and night lighting brightness was the strongest among all the driving factors. (4) Generally, the spatiotemporal dynamics of human factors, such as the time variations and the spatial heterogeneities of humanistic geographical features, had a significant shaping effect on MTGs in the southeastern China, whereas in the northwestern China MTGs was mainly driven by the temporal variations of natural geographical features and the spatial heterogeneities of humanistic geographical features. This research provides an insight for quantitative analysis of geographical uncertainty and diversity in MTGs of China, and reveals the regionality of the human-nature interaction.

Keywords: human-nature interaction; mountainous transitional geospace; spatiotemporal variability; geographic uncertainty; information entropy