

# 基于栅格的豫西山区地形起伏特征 及其对人口和经济的影响

张静静, 朱文博, 朱连奇, 崔耀平, 何莎莎, 任 涵

(河南大学环境与规划学院, 开封 475004)

**摘要:** 地形起伏是约束山区人口分布和经济发展的关键因素, 尤其在山地平原过渡带其约束作用更为显著。以位于秦岭—黄淮平原过渡带的豫西山区为例, 基于 200 m 分辨率 DEM 数据, 采用均值变点法确定地形起伏度的最佳统计单元, 并提取地形起伏度; 以 1:10 万土地利用、乡镇人口和县域各产业数据为基础, 建立人口和经济空间化模型, 同时生成 200 m 分辨率的栅格人口和经济密度图; 在系统分析地形起伏度、人口和经济密度空间分布规律的基础上, 借助统计分析方法基于栅格单元定量揭示了地形起伏度对人口和经济的影响, 并与其他地形因子的影响进行对比分析。结果表明: ① 豫西山区地形起伏度以低值为主, 58.6% 的区域地形起伏度小于等于 0.5 个基准山体的高度 (相对高差  $\leq 250$  m); 空间上呈西高东低、中间高南北低的格局, 与海拔、坡度均呈较强的正相关, 且与坡度的相关性更大。② 被选作验证的人口和经济数据与对应模拟值的线性拟合度分别为 0.943 和 0.909, 表明空间化结果能反映人口和经济分布的实际状况。③ 地形起伏度对人口和经济的影响强于其他地形因子的影响, 与人口密度和经济密度呈较好的对数拟合关系, 拟合度分别为 0.911 和 0.874; 豫西山区 88.65% 的人口居住在地形起伏度不超过 0.5 的地区, 88.03% 的生产总值分布在地形起伏度不超过 0.3 的地区。相对人口分布, 研究区的经济发展向地形起伏度低值区的集聚态势更加明显。

**关键词:** 地形起伏度; 人口和经济; 土地利用; 空间化; 栅格; 豫西山区

DOI: 10.11821/dlxb201806008

## 1 引言

地形对陆地生态系统结构及空间格局、人类生产和社会活动具有重要影响, 尤其是显著的地形起伏特征对农业生产、人口分布、城镇建设及经济发展的影响最为明显<sup>[1-5]</sup>。国内外学者关于地形对人口、经济的影响开展了研究和探索。从全球尺度出发, Meybeck 等利用地表粗糙度和海拔高度对全球山地进行了分类, 并探讨不同山地类型对全球地表水资源和人口分布的影响<sup>[1]</sup>。从国家层面, Fang 等利用高程、相对高度和坡度对中国的山区类型进行了界定和划分, 并基于县域单元将山区经济发展划分为 4 种主要类型和 23 种亚类型, 表明山区和平原经济发展差距是导致中国经济发展不平衡的主要原因之一<sup>[2]</sup>; 封志明等从栅格和县域单元两种尺度探讨了中国地形起伏度对人口分布和经济发展的影响, 表明地形起伏度应成为大尺度人居环境自然适宜性评价的一个重要指标<sup>[6-7]</sup>。

收稿日期: 2017-06-24; 修订日期: 2018-03-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(41671090) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41671090]

作者简介: 张静静(1991-), 女, 河南柘城人, 博士研究生, 主要从事山地资源与环境研究。

E-mail: zhang1126@henu.edu.cn

通讯作者: 朱连奇(1963-), 男, 河南郸城人, 教授, 博士生导师, 中国地理学会会员(S110007014M), 主要从事山地地理环境及资源开发利用研究。E-mail: lqzhu@henu.edu.cn

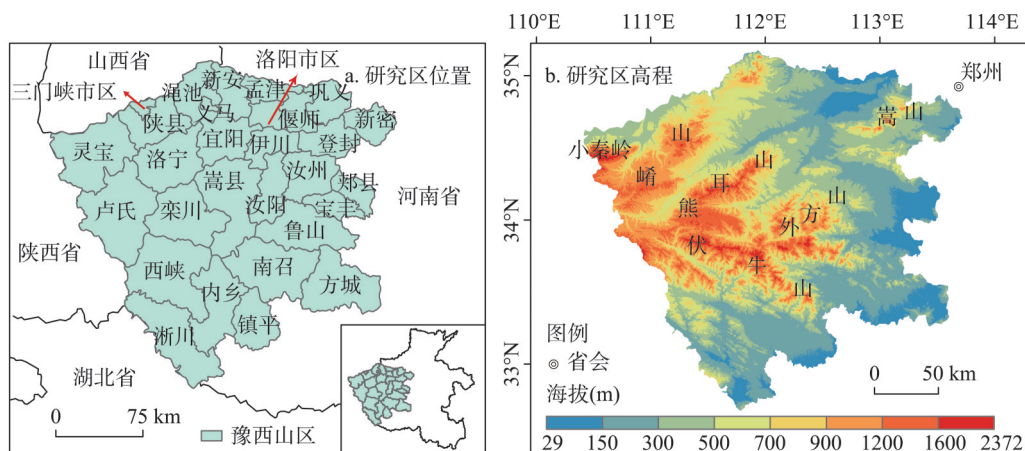
与此同时,许多学者从中小尺度层面定量分析地形起伏度对人口、经济的影响,表明地形起伏度在中小尺度人居环境自然评价方面也具有较高的实际应用价值<sup>[8-10]</sup>。还有学者采用地理探测器方法研究小尺度县域农村的贫困化机制,指出地面坡度是影响贫困化分异的主导因素之一<sup>[11]</sup>。

以往研究表明,地形因子尤其地形起伏度是影响人口分布及经济发展的重要限制因素,在进行区域宜居地选址、改善人居环境以及制定经济发展政策时,要充分考虑地形因素。但以往关于中小尺度地形因子对人口和经济的影响研究,大都基于行政单元的统计数据,往往掩盖内部人口分布和经济发展的空间差异,造成研究结果的失真,而使用空间化数据可以开展栅格尺度上的定量研究,更能凸显其现实意义。目前在GIS和RS技术,尤其在高分影像的支持下,社会经济指标的空间化、精细化成为地理学研究的热点,大大提高了社会经济数据的空间分辨率和精度<sup>[12-14]</sup>。常用的社会经济空间化模型主要包括空间插值模型、土地利用影响模型、遥感反演法等。而人口和经济分布的影响因素主要有气候、交通、土地利用、居民点以及距河流、城市的距离等,其中土地利用与人类的社会经济活动关系最密切,同时与其他要素也具有紧密的联系<sup>[15-17]</sup>。因此,土地利用影响模型被广泛地应用在人口和经济数据空间化研究方面。

豫西山区处于中国地形由第二阶梯向第三阶梯转换的地带,同时也位于秦岭山地向黄淮平原过渡的地带,地形复杂、交通不便,社会经济发展落后,属于欠发达地区<sup>[18-19]</sup>。社会及经济学家从社会组织架构、资源条件及政策与管理等方面分析了这一区域社会经济欠发达的原因<sup>[20-22]</sup>,但从地形角度探讨该区人口分布和经济发展的研究尚不多见。显著的地形起伏是该区主要地形特征,对人口和经济格局的形成起关键作用,同时复杂的地形条件导致行政单元内人口和经济的差异更加显著,因此开展栅格尺度上地形起伏对人口和经济的影响研究尤为必要。地形起伏度是表征地形起伏特征的定量指标,能直观反映地形地貌特征<sup>[23-24]</sup>;但地形起伏度的计算具有不确定性及计算尺度的依赖性,科学界定其计算尺度(即最佳统计单元)是确定区域地形起伏度的关键<sup>[25-26]</sup>。根据已有研究,非人工判别法中的“均值变点分析法”能够快速、准确地计算最佳统计单元<sup>[27-29]</sup>。本文运用该方法确定豫西山区地形起伏度的最佳统计单元,在此基础上采用人居环境自然适宜性评价背景下地形起伏度的提取方法<sup>[7]</sup>,计算地形起伏度;使用土地利用影响模型,建立人口和经济空间化模型,同时生成200 m分辨率的栅格人口和经济密度图;借助统计分析方法基于栅格单元定量揭示地形起伏度对人口和经济的影响,并与其他地形因子的影响进行对比分析。从而为该区探寻脱贫机理和开展精准扶贫工作,以及为该区人口、资源环境和社会经济的协调发展提供科学依据和决策支持。

## 2 研究区概况

豫西山区是秦岭山系在河南境内的余脉,在河南西部呈扇形展开,包括东南方向伸展的伏牛山,东北方向延伸的崤山、熊耳山和外方山,以及东西方向伸展的小秦岭和嵩山<sup>[30]</sup>。研究区包括三门峡、洛阳、南阳、平顶山和郑州的29个县级行政单元,面积为 $4.95 \times 10^4 \text{ km}^2$ (图1)。地势自西向东逐渐降低,海拔高度介于29~2372 m,平均海拔为561 m,由中山、低山逐渐变为丘陵、台地、平原和盆地,地貌类型复杂,高差起伏较大。研究区2014年末总人口为1790.8万人,城镇化率为43.9%,低于河南省平均水平(45.2%);2014年生产总值为8530.3亿元,占全省的24.1%,而土地面积占全省的30%,经济发展比较落后,属于欠发达地区。该区为河南省贫困人口集中区,截至2014年底,



注: 本文将各市的市辖区统一为市区。

图1 研究区位置及高程示意图

Fig. 1 Location reference and the elevation map of the study area

全省有53个贫困县,其中有13个分布在该区。“十三五”规划指出河南省在2019年要实现全部脱贫,扶贫工作继续以“三山一滩”为重点,实施精准扶贫,以实现经济社会健康有序地发展。

### 3 研究方法与数据来源

#### 3.1 数据来源与处理

(1) DEM数据来源于ASTER GDEM,空间分辨率为30 m,经拼接、投影、裁剪、重采样得到研究区200 m分辨率的DEM。

(2) 2014年的人口数据来源于2015年《中国县域统计年鉴(乡镇卷)》,剔除无效数据后,保留408个乡镇单元,并随机抽取70个,作为人口空间化结果的验证样本。2014年的经济数据来源于2015年《河南省统计年鉴》,包含29个县域单元各产业产值;洛阳嵩县、伊川、宜阳、汝阳及郑州巩义的乡镇生产总值来源于2015年各县(市)的统计年鉴,剔除无效数据后,保留68个乡镇单元,作为经济空间化结果的验证样本。将人口和经济数据分别除以对应统计单元的面积,得到人口密度和各产业经济密度。

(3) 1:10万土地利用和县界、乡镇界线矢量图均采用2013年的数据,来源于国家地球系统数据共享平台-黄河下游科学数据中心(<http://www.geodata.cn/>),其中土地利用数据分为6个一级类和25个二级类,研究区土地利用包括6个一级类和16个二级类。

#### 3.2 研究方法

**3.2.1 地形起伏度提取** (1) 最佳统计单元计算。地形起伏度的计算具有尺度依赖性,本文首先采用移动窗口法计算不同尺度的地形起伏度,分别统计各窗口下每个栅格邻域海拔的最大值和最小值,两者之差即为相应栅格的地形起伏度。计算公式如下:

$$M = H_{\max} - H_{\min} \quad (1)$$

式中:  $M$  为窗口中心栅格的地形起伏度值;  $H_{\max}$  为窗口内的最高海拔;  $H_{\min}$  为窗口内的最低海拔。

根据上述公式,对DEM依次开辟  $n \times n$  ( $n = 2, 3, \dots, 30$ ) 像元大小的窗口,分别统

计不同窗口下的平均地形起伏度,发现其随窗口面积的变化呈对数曲线特征(图2a),拟合度为0.98。由图2a可见,在2~8 km<sup>2</sup>之间曲线上出现由陡变缓的点,这一点称为变点。变点对应的窗口大小即为最佳统计单元。

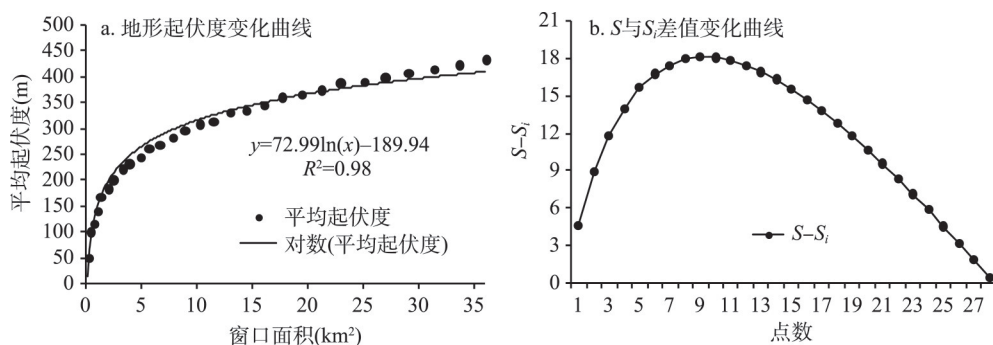


图2 平均起伏度值与窗口面积的关系及 $S$ 与 $S_i$ 差值的变化曲线

Fig. 2 Relationship between the average relief degree and the window area, and variation curve of the difference between  $S$  and  $S_i$

本文采用均值变点法计算豫西山区地形起伏度的最佳统计单元。该方法是基于数理统计的一种分析方法,可用来计算一系列数据中出现异常、发生突变的点,对恰有一个变点的计算最有效<sup>[24]</sup>。步骤如下:

① 将不同窗口下地形起伏度平均值与对应窗口面积依次相除,得到各窗口下单位面积起伏度 $T_i$ ,然后对其取对数,得到数列 $\{X_i\}$ ,并计算出数列方差 $S$ 为25.02:

$$X_i = \ln T_i \quad (2)$$

式中: $t$ 为窗口个数,取值1, 2, 3, ..., 29。

② 令 $i = 2, 3, \dots, 29$ ,每一个 $i$ 值将数列分成两部分,即 $\{X_1, X_2, \dots, X_{i-1}\}$ 和 $\{X_i, X_{i+1}, \dots, X_{29}\}$ ,然后分别求每部分的算术平均值 $X_{i1}$ 、 $X_{i2}$ 和统计量 $S_i$ :

$$S_i = \sum_{t=1}^{i-1} (X_t - X_{i1})^2 + \sum_{t=i}^{29} (X_t - X_{i2})^2 \quad (3)$$

③ 求取 $S$ 与 $S_i$ 的差值,差值达到最大时对应的窗口面积即为最佳统计单元的大小。由图2b发现,在第9个点即 $i = 10$ 时,差值达到最大(18.04),该点对应的窗口为11×11像元。由此得出,利用200 m的DEM得到豫西山区地形起伏度的最佳统计单元大小为4.84 km<sup>2</sup>。

(2) 地形起伏度计算。由于地形起伏度在不同领域的应用目的不同,导致其提取方法存在一定差异。本文探讨地形起伏度对人口和经济的影响,因此参照封志明等提出的人居环境适宜性评价背景下的提取方法<sup>[7]</sup>,计算地形起伏度。公式如下:

$$RDLS = \{[\text{Max}(H) - \text{Min}(H)] \times [1 - P(A)/A]\} / 500 \quad (4)$$

式中: $RDLS$  (Relief Degree of Land Surface, RDLS) 为地表起伏度,又称地形起伏度;  $\text{Max}(H)$  和  $\text{Min}(H)$  分别为区域内海拔的最高值和最低值(m),即相对高差;  $P(A)$  为区域内平地面积(km<sup>2</sup>),利用200 m分辨率的DEM计算得到研究区平均坡度为7.7°,本文将坡度小于等于2°的区域界定为平地;  $A$  为区域总面积,即上述最佳统计单元的大小(4.84 km<sup>2</sup>)。封志明等将500 m视为中国基准山体的高度引入地形起伏度的计算公式中,使其具备了地理学意义:当 $RDLS < 1$ 时,表明低于一个基准山体的起伏,当 $RDLS$ 为1的若干倍时,表明地形起伏为若干个基准山体的高度<sup>[7]</sup>。

**3.2.2 人口和经济数据的空间化** 本文使用土地利用影响模型对研究区人口和经济进行空间化。对于人口密度，采用乡镇统计数据，选取 $X_1$ （耕地）、 $X_{21}$ （有林地）、 $X_{22}$ （灌木林）、 $X_{23}$ （疏林地）、 $X_{24}$ （其他林地）、 $X_{31}$ （高覆盖度草地）、 $X_{32}$ （中覆盖度草地）、 $X_{33}$ （低覆盖度草地）、 $X_{51}$ （城镇用地）、 $X_{52}$ （农村居民点）、 $X_{53}$ （其他建设用地）进行空间化；对于经济密度，有研究表明分产业进行空间化有助于提高精度<sup>[17]</sup>，但由于乡镇尺度分产业的生产总值难以获取，因此采用县域分产业的统计数据，分别选取 $X_{11}$ （水田）、 $X_{12}$ （旱地）、 $X_{21}$ 、 $X_{22}$ 、 $X_{23}$ 、 $X_{24}$ 、 $X_{31}$ 、 $X_{32}$ 、 $X_{33}$ 、 $X_{41}$ （河渠）、 $X_{43}$ （水库坑塘）对第一产业经济密度进行空间化，选取 $X_{51}$ 、 $X_{52}$ 、 $X_{53}$ 对第二、三产业经济密度进行空间化。上述 $X_i$ 为各土地利用类型指数，即统计单元内各土地利用类型所占比例。需要说明的是，研究区乡镇尺度的水田面积较小，因此进行人口空间化时对耕地不再细分。对于空间化网格尺度的选取，考虑到统计数据分辨率的限制，无法对过小尺度的空间化模拟结果进行检验，同时网格越小，必然会造成数据冗余。因此空间化的网格大小统一选取200 m×200 m。空间化步骤如下：

（1）首先将研究区县界和乡镇界线分别与土地利用图叠加，统计各县、乡镇的土地利用类型指数。然后分别以338个乡镇单元的人口密度、29个县域单元各产业的经济密度为因变量，对应的土地利用类型指数为自变量，构建多元回归模型，并参照廖顺宝等人对常数项取值问题的探讨<sup>[31]</sup>，本文将常数项设为0。回归方程如表1所示，可见相关系数都较高，表明拟合效果较优。

（2）构建200 m×200 m渔网，与土地利用数据进行叠置分析，使每个网格记录各类占网格面积的百分比；在叠置后的数据图层属性表中新建字段，借助Select By Attribute功能，参照表1分别选取对应地类，依次录入回归系数；运用Field Calculator工具，进行回归运算，并将结果融合处理，使每个网格代表一个回归值，即完成人口密度、第一产业和第二、三产业经济密度的格网化；将各产业经济密度的结果进行叠加，实现经济密度的格网化。最终将格网化结果转为栅格格式，即生成200 m分辨率的人口密度和经济密度图。

表1 人口密度、经济密度分别与土地利用类型指数之间的关系

Tab. 1 The population density and economic density related to land use type indices, respectively

名称	回归方程	相关系数
人口密度	$Y = 455.22X_1 + 49.341X_{21} + 12.222X_{22} - 181.338X_{23} + 338.556X_{24} - 192.647X_{31} - 64.721X_{32} + 351.082X_{33} + 2982.149X_{51} + 2453.164X_{52} + 779.709X_{53}$	0.937
第一产业经济密度	$Y = 1171.513X_{11} + 383.519X_{12} + 36.694X_{21} + 432.508X_{22} + 719.687X_{23} - 3094.677X_{24} - 345.41X_{31} + 179.08X_{32} - 7331.019X_{33} - 1755.961X_{41} + 380.34X_{43}$	0.990
第二、三产业经济密度	$Y = 54053.11X_{51} + 14161.954X_{52} + 31699.782X_{53}$	0.975

4 结果分析

4.1 地形起伏度的分布规律

由图3a可见，豫西山区地形起伏度呈西高东低、中间高南北低的空间格局。最高值分布在小秦岭、伏牛山及熊耳山的主脊地带，太行山东南麓、外方山、嵩山及崤山为次高值区；最低值分布在研究区东部边缘的郏县和宝丰境内、东北部洛阳市区及东南部方城、镇平和淅川境内。

图3b展示地形起伏度的分布比例及面积累计频率，可见豫西山区地形起伏度以低值

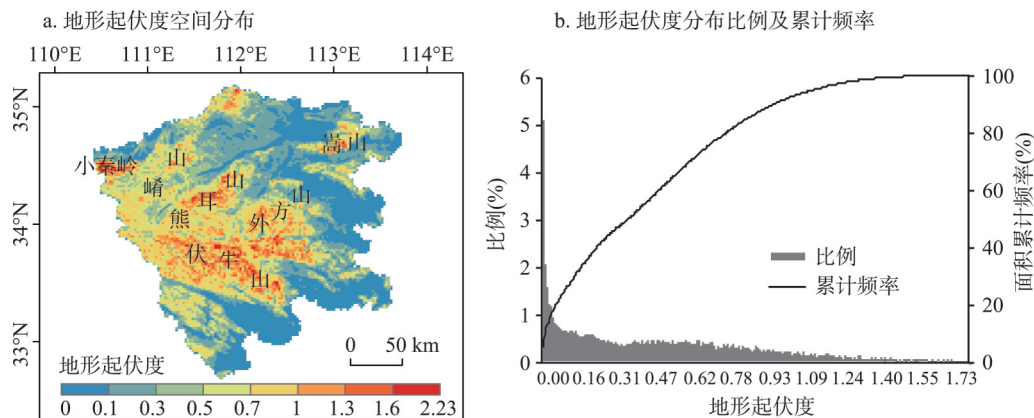


图3 豫西山区地形起伏度及其分布比例和面积累计频率  
Fig. 3 RDLS and its distribution ratio and accumulative frequency of the study area

为主。由表2发现,地形起伏度为0~0.1的区域占比例最大(24.21%),相对高差的平均值仅为48.98 m,而平地比例达到最大(70.41%);超过1.6的区域仅占0.49%,相对高差的平均值达到864.74 m,平地比例最小(0.20%)。可见随地形起伏度增加,相对高差逐渐增大,平地比例逐渐减小。结合图3b和表2还发现,当地形起伏度达到0.5时,相对高差不超过250 m,累计频率达到58.6%;当地形起伏度达到1时,相对高差不超过500 m,累计频率已达到89.76%;地形起伏度达到1.6时,相对高差不超过800 m,累计频率高达99.51%。

由图4a、图5a发现,地形起伏度与海拔、坡度均呈较强的正相关,线性拟合度分别为0.926和0.934,且与坡度的相关性更强。在海拔低于150 m时,地形起伏度与海拔的变化趋势出现不一致的现象,这可能是一些沟壑峡谷地带,海拔较低,但地形起伏相对较大;在海拔低于1800 m区域,或坡度低于30°区域,地形起伏度变化均较和缓;在海拔高于1800 m,或坡度高于30°区域,地形起伏度的变化幅度增大,这是由于该区域位于小秦岭、伏牛山及熊耳山的主脊地带,地形起伏大且破碎化明显。由图4b、5b发现,随着海拔、坡度的变化,不同地形起伏度所占比例的变化均可分为3种类型:持续减少型,都只包括0~0.2;先增加后减少型,不同海拔高度上包括0.2~0.5和0.5~0.8,不同坡度上包括0.2~0.5、0.5~0.8和0.8~1.2;持续增加型,不同海拔高度上包括0.8~1.2和≥1.2,不同坡度上仅包括≥1.2。综上所述,研究区地形起伏度低值区主要位于低海拔、低坡度地区,高值区位于高海拔、高坡度地区,随海拔、坡度的增加,地形起伏度高值区所占比例逐渐增大,呈现较强的海拔和坡度规律性。

4.2 人口和经济空间化结果分析

4.2.1 精度验证 为验证回归模型的可靠性和精度,将被选作验证的人口和经济数据与对

表2 豫西山区地形起伏度主要参数统计 Tab. 2 The main parameters corresponding to the RDLS of the study area			
地形起伏度		[Max(H)–Min(H)]	P(A)/A
值域	比例(%)	平均值(m)	平均值(%)
0~0.1	24.21	48.98	70.41
0.1~0.3	19.86	122.56	44.78
0.3~0.5	14.53	217.88	7.25
0.5~0.7	15.05	307.59	2.80
0.7~1	16.11	424.10	1.31
1~1.3	7.57	568.53	0.62
1.3~1.6	2.18	707.43	0.35
1.6~2.23	0.49	864.74	0.20

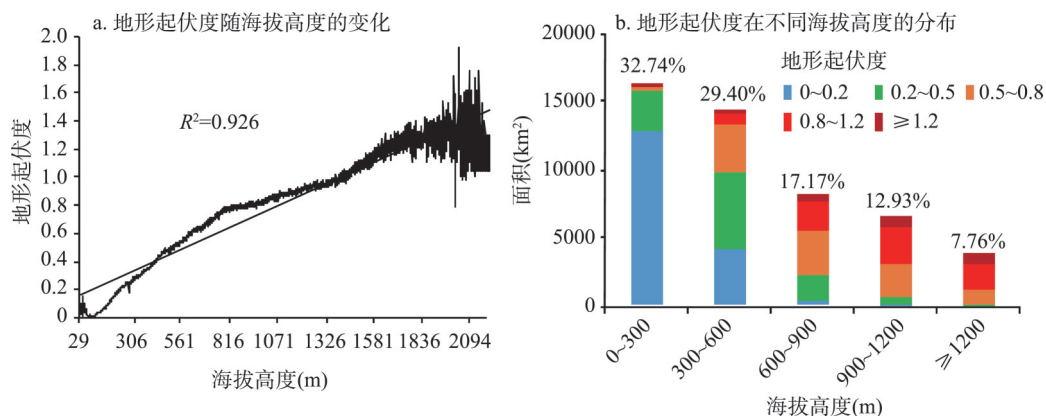


图4 地形起伏度随海拔高度的变化及其在不同海拔高度的分布

Fig. 4 Variation in RDLS along with altitude and its proportions at different altitudes

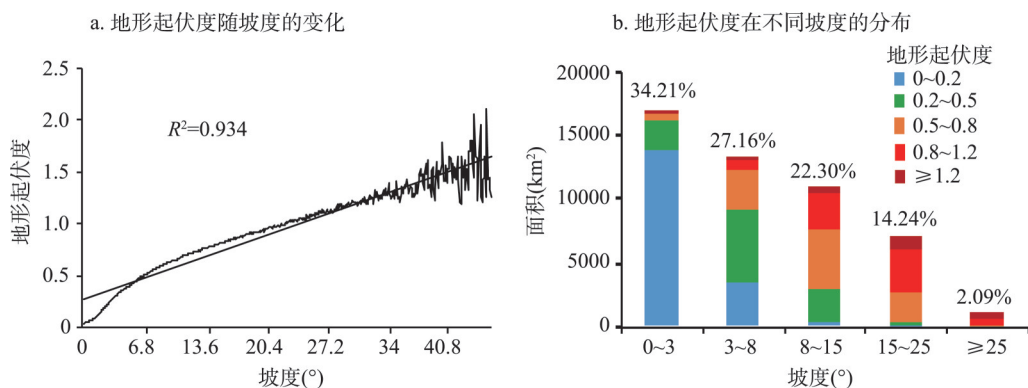


图5 地形起伏度随坡度的变化及其在不同坡度的分布

Fig. 5 Variation in RDLS along with slope and its proportions at different slopes

应模拟值进行线性拟合(图6)。人口和经济数据的统计值与模拟值的拟合度分别为0.943和0.909,表明模拟结果可信,且人口密度的模拟精度高于经济密度的模拟精度。可见采用乡镇人口和县域分产业的经济数据分别与土地利用进行建模,得到200 m $\times$ 200 m人口密度和经济密度可以反映豫西山区人口和经济分布的实际状况。

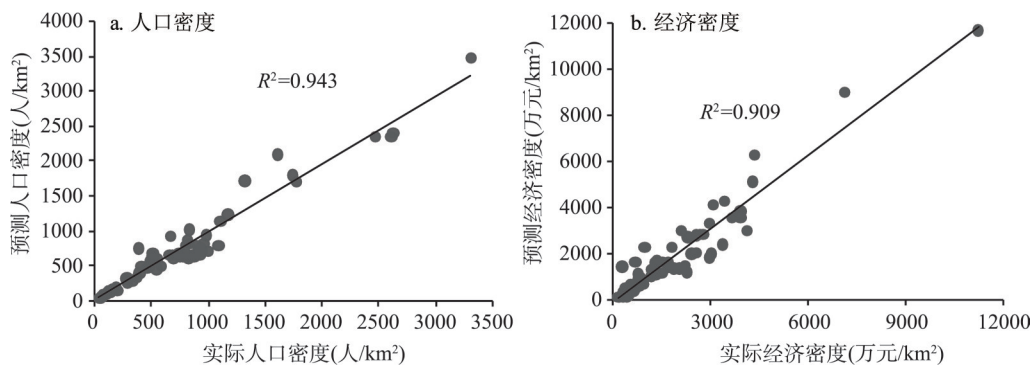


图6 模拟值与统计值的关系

Fig. 6 Relationships between simulated values and statistical values

**4.2.2 人口和经济空间分布差异分析** 由图7可见,人口密度和经济密度具有一定的空间耦合特征,在栅格尺度上计算两者相关性,为0.787 ( $P < 0.05$ ),表明豫西山区人口分布与经济发展在200 m分辨率的栅格尺度上呈现一定的协调性。两者自中西部向北、东和南3个方向递增,低值区均分布在中西部的卢氏、栾川和西峡等地,该区人口密度低于100人/km<sup>2</sup>,经济密度低于300万元/km<sup>2</sup>;高值区主要集中在东北部郑州和洛阳境内,其次为北部三门峡市区和灵宝境内,少数零星地分布在各县城关镇,人口密度高于800人/km<sup>2</sup>,经济密度高于2000万元/km<sup>2</sup>。

**4.3 地形起伏度对人口和经济的影响**

**4.3.1 与其他地形因子对人口和经济影响的对比分析** 为比较地形起伏度与其他地形因子对人口和经济影响的差异,运用区域统计分析模型,统计基于栅格的地形起伏度、海拔高度、坡度及人口密度和经济密度值,并分别进行对数曲线拟合(图8)。各地形因子对人口和经济的影响具有相似性,均表现为地形起伏度的影响最强,坡度的影响稍逊一

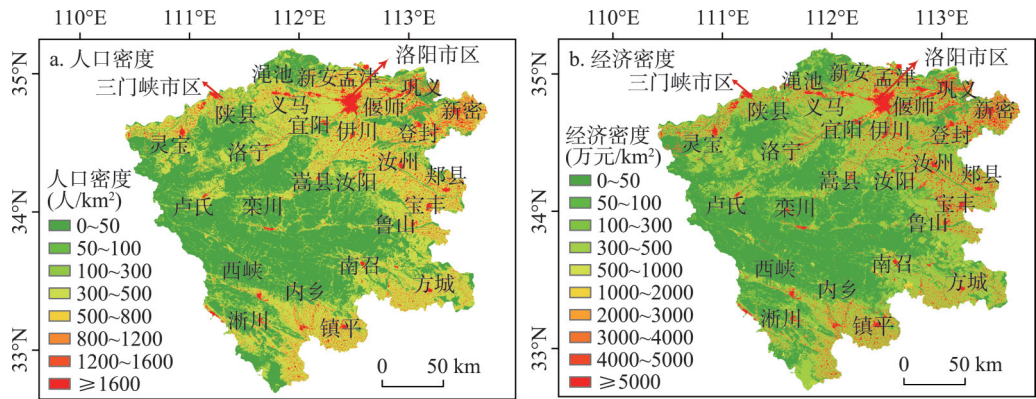


图7 豫西山区200 m×200 m分辨率的人口密度与经济密度的空间分布  
Fig. 7 Spatial distributions of population density and economic density at a resolution of 200 m by 200 m

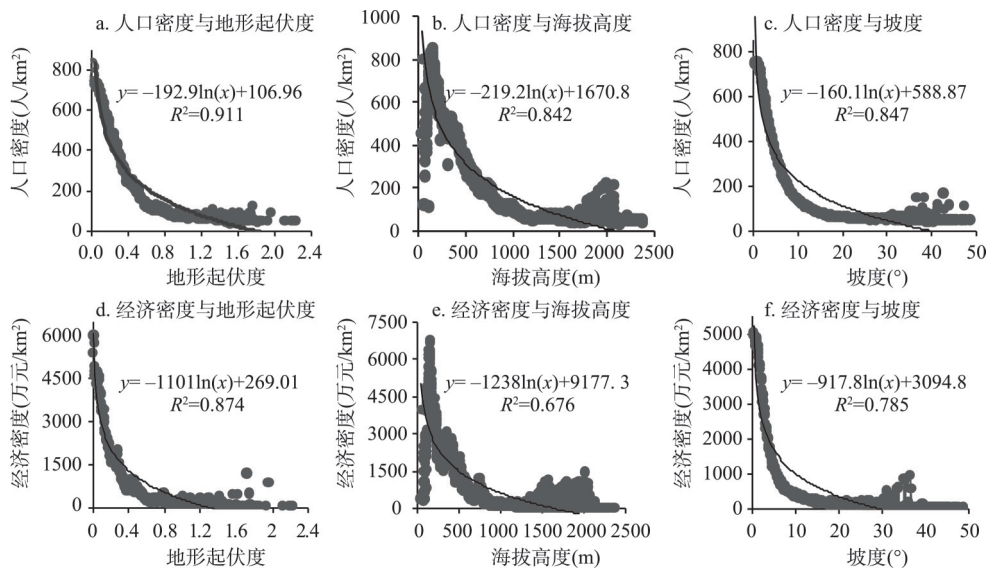


图8 地形起伏度、海拔高度及坡度分别与人口密度和经济密度的关系  
Fig. 8 Relationships among RDLS, altitude, and slope with population density and economic density

筹, 海拔高度的影响最弱。由图 8b、8e 可见, 在一些海拔较低的区域, 出现人口密度和经济密度也较低的现象, 由于该类区域多为人迹罕至的沟壑峡谷地带, 海拔较低, 但坡度和地形起伏度相对较大, 社会经济活动依然受到限制。地形起伏度与人口密度和经济密度的拟合度分别高达 0.911 和 0.874, 与其他地形因子相比, 地形起伏度的制约作用更显著。由图 8a、8d 可见, 人口密度和经济密度分别在地形起伏度达到 0.7 和 0.5 时开始出现拐点, 即分别趋近于一个固定值, 当地形起伏度继续升高, 两者不再发生明显变化, 表明 0.7 和 0.5 分别是人口密度和经济密度随地形起伏度变化的临界值。

同时, 从图中不难看出, 各地形因子与人口密度的相关性分别高于与经济密度的相关性, 并且人口密度随地形因子变化的临界值均高于经济密度的临界值。表明地形对人口的影响强于对经济的影响, 这是由于地形较平坦的地区在地方财政、基础设施和招商引资等方面存在的优势, 对经济的集聚效应强于对人口的集聚效应, 导致生产总值高度集中在这些地区, 经济发展极不均衡。

**4.3.2 地形起伏度与人口和经济空间分布的关系** 图 9 展示豫西山区人口总数、生产总值及土地面积的累计频率随地形起伏度的变化。随地形起伏度增加, 生产总值率先达到临界值 (0.5), 其次为人口总数 (0.7), 土地面积累计频率在地形起伏度为 1.3 时达到临界值。表明豫西山区大多数人口和生产总值分布在地形起伏较平缓的地区, 且人口集聚程度滞后于经济集聚程度, 经济发展的集聚效应更为明显, 两者处于中等协调耦合状态, 但与土地面积的耦合关系均较差。当地形起伏度为 0 时, 即平地 (坡度  $\leq 2^\circ$ ), 人口和生产总值分别占 10.35% 和 13.04%, 土地面积仅占 4.98%; 当地形起伏度为 0.5 时, 即相对高差不超过 250 m, 人口和生产总值累计频率分别为 88.65% 和 94.39%, 土地面积累计频率为 58.6%; 当地形起伏度超过 1 时, 即相对高差超过 500 m, 土地面积占 10.24%, 人口和生产总值仅占 1.84% 和 0.75%。

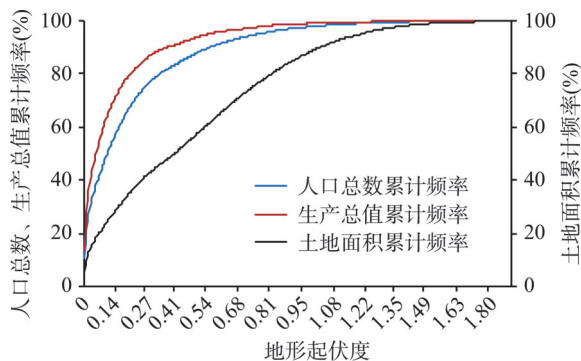


图9 人口总数、生产总值及土地面积的累计频率随地形起伏度的变化

Fig. 9 Variations in accumulative frequencies of population, gross regional product, and land area along with RDLS

随地形起伏度增加, 人口密度、经济密度、人口总数和生产总值均呈急剧衰减 (表 3)。在地形起伏度为 0~0.1 时, 人口密度和经济密度分别达到最大 (728.91 人/km<sup>2</sup> 和 4542.99 万元/km<sup>2</sup>), 人口总数和生产总值分别为 892.42 万人和 5707.36 亿元, 在面积占比不足 25% 的土地上居住着研究区 49.86% 的人口, 并创造出了研究区 64.07% 的生产总值。在地形起伏度为 0.1~0.3 向 0.3~0.5 过渡时, 人口密度和经济密度衰减幅度最大, 分别减少了 49.3% 和 61.9%, 人口总数和生产总值分别减少了 328.41 万人和 1566.36 亿元。当地形起伏度达到 0.5~0.7 时, 人口密度和经济密度下降的速度逐渐减缓, 人口累计频率和生产总值累计频率达到 95% 左右。当地形起伏度为 1.6~2.23 时, 人口密度和经济密度分别仅为 45.46 人/km<sup>2</sup> 和 60.36 万元/km<sup>2</sup>, 人口数量和生产总值分别占研究区总量的 0.07% 和 0.02%。整体来看, 研究区 88.65% 的人口分布在地形起伏度不超过 0.5 的地区, 面积占研究区的 58.6%; 88.03% 的生产总值分布在地形起伏度不超过 0.3 的地区, 面积占 44.07%。人口分布不均衡, 经济发展集聚效应显著。

表3 不同地形起伏度上土地、人口、经济统计情况  
Tab. 3 Statistics of land, population, and economy at different RDLS

地形起伏度	土地		人口密度 (人/km <sup>2</sup> )	经济密度 (万元/km <sup>2</sup> )	人口数量		生产总值		人口累计 频率(%)	生产总值 累计频率 (%)
	面积 (km <sup>2</sup> )	比例 (%)			总数 (万人)	比例 (%)	总量 (亿元)	比例 (%)		
0~0.1	11900.80	24.21	728.91	4542.99	892.42	49.86	5707.36	64.07	49.85	64.07
0.1~0.3	9760.52	19.86	511.11	2106.84	511.43	28.57	2133.51	23.95	78.43	88.03
0.3~0.5	7143.16	14.53	259.13	802.51	183.02	10.23	567.15	6.37	88.65	94.39
0.5~0.7	7399.40	15.05	132.73	349.79	98.93	5.53	255.89	2.87	94.18	97.27
0.7~1	7920.08	16.11	88.11	214.55	71.25	3.98	176.93	1.99	98.16	99.25
1~1.3	3720.68	7.57	67.63	143.66	25.23	1.41	53.59	0.60	99.57	99.85
1.3~1.6	1070.84	2.18	58.90	94.24	6.44	0.36	11.23	0.13	99.93	99.98
1.6~2.23	238.48	0.49	45.46	60.36	1.19	0.07	1.77	0.02	100.00	100.00

5 结论与讨论

5.1 讨论

(1) 对空间化模拟过程的讨论。现有文献关于使用土地利用影响模型对人口和经济空间化的模拟，多使用栅格数据层进行运算，即将每一种地类用一个栅格数据层表示，25个二级类就会产生25个数据层<sup>[32-33]</sup>，在进行数据提取和格式转换中，必然会造成信息丢失或损坏。而本文使用格网化的土地利用矢量数据（每个网格记录各地类占网格面积的百分比），借助“Select By Attribute”和“Field Calculator”功能，实现人口和经济数据格网化。与其他研究相比，本文的操作方法避免了矢量与栅格数据相互转化造成的误差，在精度和计算效率方面都有较大的改进和提高。

(2) 对人口和经济空间化结果的分析。4.2.1节的结果表明，人口和经济数据的空间化结果精度可信，且人口密度的模拟精度高于经济密度的模拟精度。根据空间化结果，得到人口密度平均值为364.17人/km<sup>2</sup>，第一产业及第二、三产业经济密度分别为199.94万元/km<sup>2</sup>和1613.84万元/km<sup>2</sup>。为进一步检验模拟精度及其差异，对模拟得到的人口总数、各产业产值及生产总值分别与对应的统计值进行误差对比分析（表4），发现人口总数的相对误差最低（0.66%），表明使用土地利用影响模型对人口的模拟效果最好。有学者利用地统计学方法对河南省人口密度的空间分布进行了模拟，指出豫西山地为人口稀疏区，人口密度的高值区和低值区与本文的研究结果十分吻合<sup>[34]</sup>。其次为第一产业的相对误差，为1.39%，模拟效果也较好。但对第二、三产业的模拟精度相对较低，同时导致生产总值的模拟精度也较低，表明仅使用土地利用对经济数据进行空间化，具有一定的局限性。目前随着RS和GIS技术的发展，经济数据空间化的遥感反演法和多源数据融合模型等应运而生<sup>[16]</sup>。因此在后续的研究中将综合遥感数据、土地利用及各种地理信息

表4 模拟结果误差分析  
Tab. 4 Error analysis of simulated results

名称	模拟值	统计值	残差	相对误差(%)
人口总数(万人)	1802.64	1790.8	11.84	0.66
第一产业(亿元)	989.7	976.09	13.61	1.39
第二、三产业(亿元)	7988.51	7554.16	434.35	5.75
生产总值(亿元)	8978.21	8530.25	447.96	5.25

数据,采用主成分分析法检验各指标之间的信息冗余,按照分城乡、分产业的思想,构建经济数据空间化模型。

(3) 地形起伏度对人口和经济的影响分析。豫西山区地形起伏度对人口分布的影响强于对经济发展的影响(图8a、8d),进一步相关性分析发现,地形起伏度与人口和经济均在0.01显著水平下呈负相关,相关系数分别为-0.784和-0.687。这一结果与Yu等研究发现三峡库区地形起伏度与人口的相关性(-0.821)强于与经济发展的相关性(-0.663)相吻合<sup>[8]</sup>。这可能是由于地形起伏较平缓的地区在地方财政、基础设施和招商引资等方面存在的优势,对经济的集聚效应强于对人口的集聚效应,导致生产总值高度集中在这些地区,经济发展极不均衡。

与以往关于中小尺度地形因子对人口和经济的影响研究相比<sup>[8-10]</sup>,本文从相同视角出发探讨了豫西山区地形起伏度对人口分布和经济发展的制约作用及其空间差异,但以往文献大多基于行政单元的统计数据,往往掩盖内部的空间差异,造成研究结果的失真。而本研究首先对人口和经济数据进行空间化,进而开展栅格尺度上的定量研究,更能凸显其现实意义,并与其他地形因子的影响进行对比分析,更加突出了地形起伏度的显著作用,有助于揭示山地平原过渡带人口和经济空间格局形成的特殊性和复杂性。但由于受数据限制,空间化建模所使用的土地利用数据的原始分辨率问题,以及使用县域分产业数据得到的经济空间化结果的精度相对较低等问题,都可能使研究结果存在一定的不确定性;同时地形起伏度、人口和经济数据的空间变异特征均存在尺度依存性,而本研究仅在200 m分辨率的栅格尺度上进行了探究,这也会使研究结果产生不确定性。未来的研究应该在提高基础数据精度的基础上,探讨地形起伏度对人口、经济影响的尺度效应,从而更精准地刻画地形起伏度与社会经济的关系及差异规律,以期为山区精准扶贫工作的实施提供科学依据。

## 5.2 结论

(1) 豫西山区地形起伏度以低值为主,58.6%的区域地形起伏度低于0.5个基准山体的高度(相对高差 $\leq 250$  m),其中平地(坡度 $\leq 2^\circ$ )占46.06%。空间上呈西高东低、中间高南北低的格局,与海拔、坡度均呈较强的正相关,且与坡度的相关性更大。

(2) 被选作验证的人口和经济数据与对应模拟值的线性拟合度分别为0.943和0.909,表明空间化结果能反映人口和经济分布的实际状况。人口密度和经济密度均自中西部向北、东和南3个方向递增,低值区分布在中西部卢氏、栾川和西峡等地;高值区主要集中在东北部郑州和洛阳境内,其次为北部三门峡市区和灵宝境内,少数零星地分布在各县城关镇。

(3) 地形起伏度对人口和经济的影响强于其他地形因子的影响,与人口密度和经济密度呈较好的对数拟合关系,拟合度分别为0.911和0.874;豫西山区88.65%的人口分布在地形起伏度不超过0.5的地区,土地面积占58.6%;88.03%的生产总值分布在地形起伏度不超过0.3的地区,土地面积占44.07%。相对人口分布,研究区的经济发展向地形起伏度低值区的集聚态势更加明显。

## 参考文献(References)

- [1] Meybeck M, Green P, Vörösmarty C. A new typology for mountains and other relief classes: An application to global continental water resources and population distribution. *Mountain Research and Development*, 2001, 21(1): 34-45.
- [2] Fang Y P, Ying B. Spatial distribution of mountainous regions and classifications of economic development in China. *Journal of Mountain Science*, 2016, 13(6): 1120-1138.

- [3] Li Y, Yang X, Cai H, et al. Topographical characteristics of agricultural potential productivity during cropland transformation in China. *Sustainability*, 2015, 7(7): 96-110.
- [4] Baumann M, Kuemmerle T, Elbakidze M, et al. Patterns and drivers of post-socialist farmland abandonment in Western Ukraine. *Land Use Policy*, 2011, 28(3): 552-562.
- [5] Shao Jing'an, Zhang Shihao, Li Xiubin. Farmland marginalization in the mountainous areas: Characteristics, influencing factors and policy implications. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(2): 227-242. [邵景安, 张仕超, 李秀彬. 山区耕地边际化特征及其动因与政策含义. *地理学报*, 2014, 69(2): 227-242.]
- [6] Feng Zhiming, Zhang Dan, Yang Yanzhao. Relief degree of land surface in China at county level based on GIS and its correlation between population density and economic development. *Jilin University Journal Social Sciences Edition*, 2011, 51(1): 146-151. [封志明, 张丹, 杨艳昭. 中国分县地形起伏度及其与人口分布和经济发展的相关性. *吉林大学社会科学学报*, 2011, 51(1): 146-151.]
- [7] 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.]
- [8] Yu H, Luo Y, Liu S Q, et al. The influences of topographic relief on spatial distribution of mountain settlements in Three Gorges Area. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 74(5): 4335-4344.
- [9] Xiao Chiwei, Liu Ying, Li Peng. Analysis of pattern changes of population distribution and economic development in Jiangxi Province based on relief degree of land surface. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2016, 36(2): 222-227. [肖池伟, 刘影, 李鹏. 基于地形起伏度的江西省人口—经济格局变化分析. *水土保持通报*, 2016, 36(2): 222-227.]
- [10] Chen Tiantian, Peng Li, Liu Shaoquan, et al. Relationships of relief degree of topography with population and economy in Hengduan mountain area based on GIS. *Journal of University of Chinese Academy of Sciences*, 2016, 33(4): 505-512. [陈田田, 彭立, 刘邵权, 等. 基于GIS的横断山区地形起伏度与人口和经济的关系. *中国科学院大学学报*, 2016, 33(4): 505-512.]
- [11] Liu Yansui, Li Jintao. Geographic detection and optimizing decision of the differentiation mechanism of rural poverty in China. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 161-173. [刘彦随, 李进涛. 中国县域农村贫困化分异机制的地理探测与优化决策. *地理学报*, 2017, 72(1): 161-173.]
- [12] Wu Jiansheng, Xu Duo, Xie Wudan, et al. Spatialization of demographic data at medium scale based on remote sensing images: Regarding Beijing-Tianjin-Hebei as an example. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2015, 51(4): 707-717. [吴健生, 许多, 谢舞丹, 等. 基于遥感影像的中尺度人口统计数据空间化: 以京津冀地区为例. *北京大学学报(自然科学版)*, 2015, 51(4): 707-717.]
- [13] Kan K. Residential mobility and social capital. *Journal of Urban Economics*, 2007, 61(3): 436-457.
- [14] Wang Fahui. Spatially-integrated social sciences and GIS: A personal perspective. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(8): 1089-1100. [王法辉. 社会科学和公共政策的空间化和GIS的应用. *地理学报*, 2011, 66(8): 1089-1100.]
- [15] Bai Zhongqiang, Wang Juanle, Yang Yaping, et al. Characterizing spatial patterns of population distribution at township level across the 25 provinces in China. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(8): 1229-1242. [柏中强, 王卷乐, 杨雅萍, 等. 基于乡镇尺度的中国25省区人口分布特征及影响因素. *地理学报*, 2015, 70(8): 1229-1242.]
- [16] Li Fei, Zhang Shuwen, Yang Jiuchun, et al. A review on research about spatialization of socioeconomic data. *Geography and Geo-Information Science*, 2014, 30(4): 102-107. [李飞, 张树文, 杨久春, 等. 社会经济数据空间化研究进展. *地理与地理信息科学*, 2014, 30(4): 102-107.]
- [17] Huang Ying, Bao Anming, Chen Xi, et al. Studying the GDP in 1 km square grid-cells based on oasis land use. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, 31(1): 162-169. [黄莹, 包安明, 陈曦, 等. 基于绿洲土地利用的区域GDP公里格网化研究. *冰川冻土*, 2009, 31(1): 162-169.]
- [18] Zhang Jingjing, Zhenghui, Zhu Lianqi, et al. Multi-dimensional changes of vegetation NDVI and its response to climate in Western Henan Mountains. *Geographical Research*, 2017, 36(4): 765-778. [张静静, 郑辉, 朱连奇, 等. 豫西山地植被NDVI及其气候响应的多维变化. *地理研究*, 2017, 36(4): 765-778.]
- [19] Zhang Yongmin, Xiao Fengjin. Study on precipitation and temperature change in Western Henan Mountain area. *Journal of Natural Resources*, 2010, 25(12): 2132-2141. [张永民, 肖风劲. 豫西山区降水与气温的波动规律研究. *自然资源学报*, 2010, 25(12): 2132-2141.]
- [20] Du Junwei. Study on rural poverty alleviation and development of three mountains and one beach area in Henan Province [D]. Wuhan: Central China Normal University, 2015. [杜军伟. 河南三山一滩农村扶贫开发问题研究[D]. 武汉:

汉: 华中师范大学, 2015.]

- [21] Li Xiaojian. The role of rural household behavior in economic development of less developed rural area: A case study of Western Henan Mountains and Hilly Region, China. *Acta Geographica Sinica*, 2002, 57(4): 459-468. [李小建. 欠发达农区经济发展中的农户行为: 以豫西山地丘陵区为例. *地理学报*, 2002, 57(4): 459-468.]
- [22] Li Xiaojian, Xu Jiawei, Hai Beibei. The changing distribution patterns of rural settlements during the process of urbanization: The case of Gongyi (1929-2013), China. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(12): 1870-1883. [李小建, 许家伟, 海贝贝. 县域聚落分布格局演变分析: 基于1929-2013年河南巩义的实证研究. *地理学报*, 2015, 70(12): 1870-1883.]
- [23] Cheng Weiming, Zhou Chenghu. Methodology on hierarchical classification of multi-scale digital geomorphology. *Progress in Geography*, 2014, 33(1): 23-33. [程维明, 周成虎. 多尺度数字地貌等级分类方法. *地理科学进展*, 2014, 33(1): 23-33.]
- [24] Fan Jianrong, Zhang Ziyu, Li Lihua. Mountain demarcation and mountainous area divisions of Sichuan Province. *Geographical Research*, 2015, 34(1): 65-73. [范建容, 张子瑜, 李立华. 四川省山地类型界定与山区类型划分. *地理研究*, 2015, 34(1): 65-73.]
- [25] Tang Guo'an. Progress of DEM and digital terrain analysis in China. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(9): 1305-1325. [汤国安. 我国数字高程模型与数字地形分析研究进展. *地理学报*, 2014, 69(9): 1305-1325.]
- [26] Liu C, Sun W, Wu H. Determination of complexity factor and its relationship with accuracy of representation for DEM terrain. *Geo-spatial Information Science*, 2010, 13(4): 249-256.
- [27] Prima O D A, Echigo A, Yokoyama R, et al. Supervised landform classification of Northeast Honshu from DEM-derived thematic maps. *Geomorphology*, 2006, 78(3): 373-386.
- [28] Zhang X R, Dong K. Neighborhood analysis-based calculation and analysis of multi-scales relief amplitude. *Advanced Materials Research*, 2012, 468-471: 2086-2089.
- [29] Wang L, Tong X J. Analysis on relief amplitude based on change point method. *Geography and Geo-Information Science*, 2007, 23(6): 65-67.
- [30] Zhang Guangye. Mountain system of Henan Province. *Journal of Henan University (Natural Science Edition)*, 1988, 18(1): 11-17. [张光业. 河南省山地系统. *河南大学学报(自然科学版)*, 1988, 18(1): 11-17.]
- [31] Liao Shunbao, Ji Guangxing, Hou Pengmin, et al. Discussion on two key problems of multivariable linear regression models for spatialization of grain yield. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(11): 1922-1932. [廖顺宝, 姬广兴, 侯鹏敏, 等. 面向粮食产量空间化的多元回归分析模型中的两个关键问题探讨. *自然资源学报*, 2015, 30(11): 1922-1932.]
- [32] Han Xiangdi, Zhou Yi, Wang Shixin, et al. GDP spatialization in China based on DMSP/OLS data and land use data. *Remote Sensing Technology and Application*, 2012, 27(3): 396-405. [韩向娣, 周艺, 王世新, 等. 基于夜间灯光和土地利用数据的GDP空间化. *遥感技术与应用*, 2012, 27(3): 396-405.]
- [33] Liao Shunbao, Li Zehui. Study on spatialization of population census data based on relationship between population distribution and land use: Taking Tibet as an example. *Journal of Natural Resources*, 2003, 18(6): 659-665. [廖顺宝, 李泽辉. 基于人口分布与土地利用关系的人口数据空间化研究: 以西藏自治区为例. *自然资源学报*, 2003, 18(6): 659-665.]
- [34] Zhang Haixia, Niu Shuwen, Qi Jinghui, et al. Geological statistics analysis of population distribution at township level in Henan Province. *Geographical Research*, 2016, 35(2): 325-336. [张海霞, 牛叔文, 齐敬辉, 等. 基于乡镇尺度的河南省人口分布的地统计学分析. *地理研究*, 2016, 35(2): 325-336.]

## Spatial variation of terrain relief and its impacts on population and economy based on raster data in West Henan Mountain Area

ZHANG Jingjing, ZHU Wenbo, ZHU Lianqi, CUI Yaoping, HE Shasha, REN Han

(College of Environment and Planning, Henan University, Kaifeng 475004, Henan, China)

**Abstract:** Topographic relief can be the constraining factor for the population and economic development in an area. This is especially the case in transitional zones from mountains to plains. In this study, West Henan Mountain Area, situated in the transitional zone from the Qinling Mountains to the Huang-Huai Plain (i.e. the second step to the third step of Chinese macro-topography), was selected as a case study area. Based on the optimal statistical unit (OSU) as determined by the mean turning-point analysis method (MTPAM), a DEM of 200 m resolution was used to extract the relief degree of land surface (RDLS). Integrating the 1:100,000 land use map, statistical population data at township level and economic data of various industries at county level, raster models of spatial patterns of population and economy were formulated, and then the spatial distributions of population density and economic density at a resolution of 200 m by 200 m were produced using the models. Subsequently, statistical analysis was carried out to reveal the effects that RDLS had on population and economy based on raster data (i.e. RDLS, population density, and economic density), and the differences between the effects of RDLS and those of other terrain factors on the population and economy were also analyzed. The results showed that: (1) the RDLS in the West Henan Mountain Area was prevailed by low value, with 58.6% of the area having the RDLS lower than 0.5 (relative altitude of  $\leq 250$  m). Spatially, RDLS was higher in the west and lower in the east, higher in the central part and lower in the south and the north. Moreover, there existed strong positive correlations between RDLS and altitude and slope, especially correlated with slope significantly. (2) The relationships between the statistical values (i.e. population density and economic density which were selected to test and verify the models) and the corresponding simulated values were fitted to linear models with 0.943 and 0.909 levels of goodness-of-fit. This fitness indicated that the spatialization results reflected well the actual spatial patterns of population and economy in the study area. (3) The effect of RDLS on population and economy is stronger than that of other terrain factors. RDLS had a good logarithmic fit with population density and economic density, with 0.911 and 0.874 goodness-of-fit, respectively. Specifically, 88.65% of the total population lived in the areas where RDLS was less than 0.5 and 88.03% of the gross regional production was distributed in the areas where RDLS was less than 0.3. It can be clearly seen that economic development was more inclined to agglomerate in areas of lower RDLS values compared with population distribution.

**Keywords:** relief degree of land surface (RDLS); population and economy; land use; spatialization; grid; West Henan Mountain Area