

# 2000—2020年中国人口数量在地形梯度上的分布与变化特征

彭秋志<sup>1,2,3</sup>, 黄培依<sup>1</sup>, 陈 笛<sup>1</sup>, 朱 丹<sup>1</sup>

(1. 昆明理工大学国土资源工程学院, 昆明 650093; 2. 云南省高校高原山区空间信息测绘技术应用工程研究中心, 昆明 650093; 3. 云南省自然资源与规划智慧创新实验室, 昆明 650093)

**摘 要:**人口在地形梯度上的分布与变化规律是人口地理学研究的基本问题之一,随着数据精度和质量的提升,基于公里网格统计单元宏观分析该问题已具可行性。论文以公里网格为统计单元,结合 WorldPop 数据集和 SRT-MGL1 数据集,分析了 2000—2020 年间中国人口数量在地形因子(海拔、起伏度和坡度)梯度上的分布与变化特征,比较了不同人口空间化数据集、DEM 数据源以及网格大小对计算结果的影响。结果表明:① 人口数量分布呈现强烈且持续小幅增强的低地形指向性,海拔、起伏度和坡度梯度上,人口分布半数平衡点在 2000 年分别为 95.6 m、50.7 m 和 3.01°,到 2020 年下降至 77.0 m、46.8 m 和 2.88°。② 相对土地面积分布,人口数量分布呈现范围稳定且强度持续小幅增强的低地形优势性,海拔、起伏度和坡度梯度上,人口主体优势分布上界分别较稳定地位于 520 m、137 m 和 6.84°附近,人口主体优势率分别上升了 0.011、0.026 和 0.038。③ 除 DEM 数据源差异对人口数量的起伏度分布和坡度分布有显著影响外,其他各项数据差异并未产生明显影响。研究可为宏观理解中国人口分布与地形的关系提供新的基础参考。

**关键词:**人口;地形梯度;海拔;起伏度;坡度;公里网格;中国

开展地形因子梯度上的人口分布及变化特征分析,可为相关领域研究提供参考和启示,是人口地理学研究中的一项基础性工作<sup>[1-2]</sup>。依据不同的山地定义,全球除南极洲外 12%~30% 的陆地表面为山地,有 5 亿~15 亿人居住在山区<sup>[3]</sup>,探究人口分布及其变化现象与地形因子的关系已成为山区可持续发展研究的重要内容<sup>[4]</sup>。在有 14 亿多人口的中国,近 1/2 的人口分布于占国土面积约 2/3 的山地区域<sup>[5]</sup>,相较之下,这类研究更加重要。特别是在 21 世纪的前 20 年里,中国不仅增长了近 1.5 亿人口,更经历了以城镇化为主要表现的人口大迁移<sup>[6-7]</sup>,目前尚不清楚这些变化会在多大程度上影响地形梯度上的人口分布。

地形对人口分布有着深刻的影响,学者们已从不同角度开展了广泛研究,大体上这些研究均是围绕着地形因子和人口数据展开的。地形因子是可

从多个视角进行表达的综合概念,已有研究所涉及的具体地形因子主要有海拔、坡度、坡向、起伏度、地表粗糙度、高程变异系数等。海拔是最先引起学界关注的地形因子之一。波兰地理学家约·斯塔布斯于 1957 年发表的“世界人口的垂直分布”一文,基于 5 个海拔区段对全球和各大洲人口进行了统计,开拓了定量研究人口垂直分布的研究领域<sup>[8]</sup>。出版于 1984 年的《中国人口地理》一书首次对中国人口的垂直分布进行了系统研究,并基于 5 个海拔区段统计了全国及各省域的人口垂直分布<sup>[9]</sup>。随着数字高程模型(DEM)数据获取门槛的降低,海拔已成为众多研究所选用的常规地形因子<sup>[10-13]</sup>。起伏度和坡度是表达局部地形复杂程度的两个常用地形因子,通常认为它们对人口分布的影响要比海拔更具普遍性<sup>[8]</sup>。其中,起伏度可在灵活的分析窗口下探讨地面高低起伏对人口分布的影响,近十几年来颇受

收稿日期:2023-02-21;修订日期:2023-05-19。

基金项目:国家自然科学基金项目(41961039)。[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41961039.]

第一作者简介:彭秋志(1982—),男,云南文山山人,博士,讲师,主要从事土地生态学研究。E-mail: pengqiuzhi@kust.edu.cn

引用格式:彭秋志,黄培依,陈笛,等. 2000—2020 年中国人口数量在地形梯度上的分布与变化特征 [J]. 地理科学进展, 2023, 42(10): 2019-2032. [Peng Qiuzhi, Huang Peiyi, Chen Di, et al. Distribution and change of China's population on the terrain gradients from 2000 to 2020. Progress in Geography, 2023, 42(10): 2019-2032.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2023.10.013

关注<sup>[14-16]</sup>,其最佳分析窗口的确定问题<sup>[17-18]</sup>和表达方式的优化问题<sup>[19-20]</sup>也不断引起学者们的探究兴趣;坡度则通过影响每一微观地块的工程建设决策而系统性影响着宏观人口分布,在相关研究中同样获得了广泛关注<sup>[21-23]</sup>。坡向也是较早受到关注的地形因子。虽然存在能证明坡向对人口分布有明显影响的典型案例<sup>[24]</sup>,但在基于DEM数据的区域性统计研究中,坡向的影响大多不明显<sup>[22,25]</sup>,该因子近来已较少被选用。其他地形因子目前仅出现在少部分研究中<sup>[26-28]</sup>。综合来看,海拔、起伏度和坡度是更常用的3种地形因子。在区域尺度,已有一些研究同时分析了这3种地形因子与人口数量分布的关系,如针对贵州省乌江流域<sup>[21]</sup>、兰西城市群<sup>[22]</sup>等的研究。但在全国尺度,现有研究分析了海拔梯度<sup>[8-9,29]</sup>,而起伏度梯度和坡度梯度仍少被提及。

与地形因子相比,由于调查或探测手段的限制,直接获取高质量高分辨率人口分布数据的难度要大得多。长期以来,涉及人口与地形关系的研究大多基于行政单元人口调查数据。胡焕庸<sup>[30]</sup>早在1935年便指出“人口统计之地域愈小,则根据而作之人口分布地图或密度计算,当愈正确而精密”。但即使小至村级行政单元,统计单元间的面积和形状差异效应也无法完全消除。为摆脱行政单元的束缚,人口分布空间化研究成为了重要解决之道<sup>[31]</sup>。在行政单元调查数据之外,土地利用<sup>[32]</sup>、房屋建筑<sup>[33]</sup>、地域分区<sup>[34]</sup>、夜间灯光<sup>[35]</sup>、定位信号<sup>[36-37]</sup>等也逐渐成为重要数据来源。借助机器学习、多源融合、时空插值等手段<sup>[38-39]</sup>,理论上可以生产出任意时空分辨率的人口分布数据。如今已能获取多种细至公里网格尺度且年度时间序列相对完整的人口空间化数据产品<sup>[40-41]</sup>,例如WorldPop<sup>[42]</sup>、LandScan<sup>[43]</sup>等。尽管没有哪套数据是完全精准的,但鉴于公里网格数据是对行政统计单元(通常是县级)调查结果的进一步细化,因此可认为,相较于以往常用的行政单元人口调查数据,公里网格人口数据已更加“正确而精密”。

总的来说,以往研究更多以具体区域为对象,较少开展全国性分析;更多基于粗粒度且形状不规则的行政单元,较少采用细粒度的规则网格单元;更多在具体区域研究中进行多地形因子对比,较少在全国性研究中进行此类比较;更多开展静态分析,较少进行时间序列对比。简言之,尚缺乏同时兼顾全国性、细粒度、多地形因子和时间序列对比的研究,不利宏观把握此方面的最新地理国情。如

今,相关数据和方法均已具备可行性,全国性的分析统计数据也已长期未更新,有必要及时开展此项研究。为此本文将选用WorldPop人口数据(2000—2020年逐年)和SRTMGL1 DEM数据,探究公里网格尺度中国人口数量在3种地形因子(海拔、起伏度、坡度)梯度上的分布与变化特征,并用对照实验明晰数据来源和数据分辨率因素对分析结果的影响,以期为人地地理学研究提供新的基础参考。

## 1 数据与方法

### 1.1 数据来源与处理

人口数据选用WorldPop数据集(<https://www.worldpop.org/>)。已有针对中国的对比研究表明,该数据集不仅在估计精度上优于GPW、GRUMP和CnPop数据集<sup>[44]</sup>,而且在与微观人口分布模式的契合性方面也优于GPW、GHS和LandScan数据集<sup>[45]</sup>。文中选用WorldPop数据的Unconstrained individual countries 2000–2020(分辨率1 km)版本(共计21年的逐年数据),以最邻近重采样方式转换为WGS\_1984\_Albers投影而得到待分析公里网格人口数据。

用于获取地形因子的DEM数据采用SRTMGL1数据集(<https://e4ftl01.cr.usgs.gov/>)。该数据集的水平空间分辨率为1"(约相当于赤道处的30 m),绝对高程精度在10 m以内。与另一个同样常用的1"分辨率数据集ASTER GDEM相比,该数据集不仅具有更高的总体高程精度<sup>[46]</sup>,更值得关注的是,由它可生成更准确的局部地形因子(如坡度和起伏度)<sup>[47]</sup>。主要处理步骤包括:① 将全国SRTMGL1数据瓦片镶嵌为一个整体,并以最邻近重采样方式转换为30 m分辨率的WGS\_1984\_Albers投影,得到30 m分辨率海拔栅格,并将海拔值为负数的栅格赋值为0以简化分析;② 借助焦点统计工具和坡度计算工具,基于30 m分辨率海拔栅格分别生成同分辨率下的起伏度栅格和坡度栅格,其中起伏度“最佳”计算窗口尚无定论,文中综合参考有关文献<sup>[48-50]</sup>,选用边长为2 km(67个像元)的方形窗口;③ 借助块统计工具,以均值统计方式在33个像元×33个像元窗口下,分别将30 m分辨率的海拔、起伏度和坡度栅格转换成公里网格均值形式,进而以最邻近法重采样为1 km分辨率的海拔、起伏度和坡度栅格;④ 借助栅格计算器工具,对1 km分辨率的海拔、起伏度和坡度栅格进行精细梯度划分,其中海拔和起伏度的梯度间隔为1 m,坡度间隔为0.01°;⑤ 借助分区

统计工具,获取每一海拔梯度上的人口总数,据其构建海拔梯度上的人口频率分布数据,同理可得起伏度梯度和坡度梯度上的人口频率分布数据。

上述数据统计范围包含全国34个省级行政区,仅将完全位于国境线内的公里网格纳入统计。每一地形因子梯度从2000—2020年21个年份的人口频率分布数据均单独获取和分析。考虑到地形梯度上的人口逐年变化十分微小,为使其易于辨认,当整体表达地形因子梯度上的各类分布曲线特征时,仅展示10年间隔(2000、2010和2020年)的分析结果。

## 1.2 分析方法

### 1.2.1 频率分布和频率累加分布

频率分布作为基本的统计方法,通常是指样本在自变量因子梯度上每一区段的数量占比(即频率)所构成的一维数值序列,常以直方图或折线图形式表达,相应可称为频率分布直方图或频率分布曲线。针对特定因子梯度,频率分布曲线中第*i*区段的频率 $P_i$ 可表示为:

$$P_i = A_i / A \quad (1)$$

式中: $A_i$ 为第*i*区段的样本数量, $A$ 为所有区段样本数量之和。频率分布曲线中所有区段频率之和等于1,这一性质有助于在同一因子梯度上对比不同类型数据的分布情况。

频率累加分布是频率分布的顺向(顺自变量增大方向)累加形式,频率分布曲线在第*i*区段的频率累加值 $CP_i$ 可表示为:

$$CP_i = \sum_{j=1}^i P_j \quad (2)$$

式中: $P_j$ 为第*j*区段的频率。频率累加分布曲线能够抑制局部区段上的频率波动,从而使频率分布曲线的整体形态和变化趋势更易于描述。

### 1.2.2 累加关键值、半数平衡点及主流上限点

累加关键值是频率累加分布曲线上对应着指定纵坐标值的横坐标位置,可用于简化且定量地描述频率分布曲线的关键形态特征。以频率累加90%关键值为例,可记为 $F_{90\%}$ ,表示刚好有90%的样本分布在该横坐标位置之前。为减少表达冗余,文中着重选择半数平衡点位置和主流上限点位置进行示例性表述。其中,半数平衡点即 $F_{50\%}$ ,因该点刚好把人口划分为数量相等的两部分,故得名;主流上限点即 $F_{95\%}$ ,用于标示地形梯度上大多数(95%)人口分布的上限位置<sup>[51]</sup>。

### 1.2.3 频率差值分布和频率差值累加分布

在同一自变量梯度上的两条频率分布曲线间

进行对位差值运算,得到频率差值曲线。频率差值曲线上第*i*区段的频率差值 $D_{i,ab}$ 可表示为:

$$D_{i,ab} = P_{i,a} - P_{i,b} \quad (3)$$

式中: $P_{i,a}$ 和 $P_{i,b}$ 分别为频率分布曲线*a*和*b*在第*i*区段的频率。频率差值曲线可使目标曲线*a*相对于参考曲线*b*的优势(或劣势)区段更易于识别和观察。

频率差值累加分布是频率差值分布的顺向累加形式,如下式:

$$CD_{i,ab} = CP_{i,a} - CP_{i,b} = \sum_{j=1}^i (P_{j,a} - P_{j,b}) \quad (4)$$

式中: $CD_{i,ab}$ 为第*i*区段的频率差值累加值, $CP_{i,a}$ 和 $CP_{i,b}$ 分别为频率累加分布曲线*a*和*b*在第*i*区段的取值。频率累加差值分布曲线同样具有抑制局部波动的功能,可据其识别目标曲线相对于参考曲线的优势(或劣势)区段主体部分。

### 1.2.4 主体优势分布上界与主体优势率

人口数量频率分布曲线相对于土地面积频率分布曲线的优势区段通常更多出现于地形梯度的较低位置。如果仅基于频率差值分布曲线进行观察,可能发现多个人口优势分布区段,这样虽能提供更多细节信息,但不利于清晰识别地形梯度上人口数量相对于土地面积优势分布区间的整体上界。为此,可构建人口与土地的频率差值累加分布曲线,据其实现对该“上界”位置的确定性识别。具体而言,据式(4)可推知,该曲线的取值将随地形梯度增大而先增后减,当到达取值最大处时,其横坐标值即为主体优势分布上界(记为MU),纵坐标值就是主体优势率。

### 1.2.5 频率叠合度

频率叠合度用于定量判别两条频率分布曲线之间的接近程度,公式如下:

$$S_{a\&b} = 1 - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n |P_{i,a} - P_{i,b}| \quad (5)$$

式中: $S_{a\&b}$ 为频率分布曲线*a*与*b*之间的叠合度,取值范围为[0, 1],数值越大表示两条曲线间的相似程度越高(本文将该值大于0.95的情形视作高度相似),两者分布越接近,反之,差异越大; $n$ 表示地形因子梯度上的总区段数。

## 2 结果分析

### 2.1 中国地形与人口数量空间分布

中国地势西高东低,呈阶梯状分布(图1a),第一级阶梯主要是海拔普遍高于4000 m的青藏高原,第



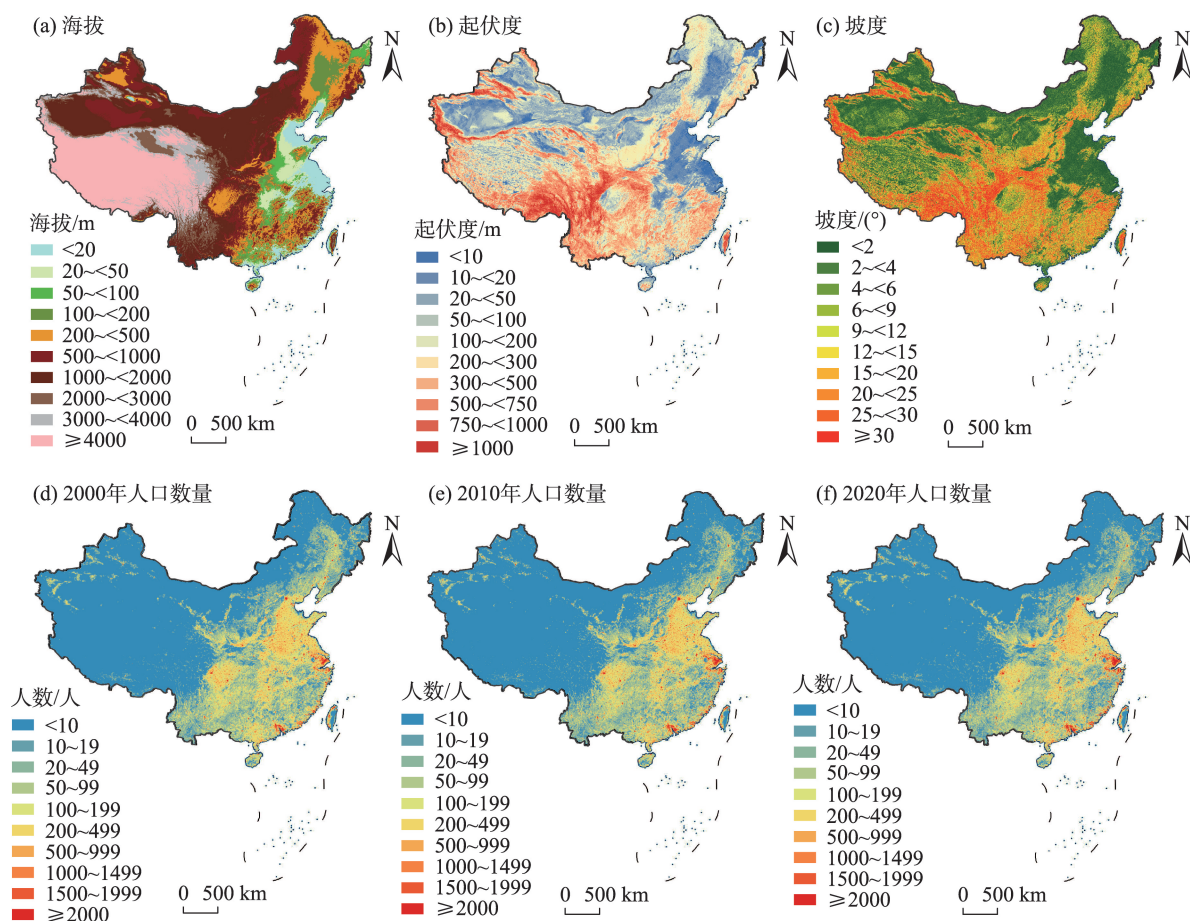
三级阶梯主要位于海拔小于500 m的东部平原、丘陵区,第二级阶梯呈“T”型介于二者中间。境内地形起伏呈现较为复杂的空间分异(图1b),总体表现为南高北低,其中西南山区是最大的高值集中区,华北及东北平原区则是低值的主要分布区。坡度空间分异格局(图1c)总体类似于起伏度,但二者间还是存在一些局部差异,例如喀斯特丘陵区会出现高坡度和低起伏度共存的现象。而中国人口分布不均,具有明显相反的“东高西低”特征(图1d~1f),即东部沿海地区人口数量较高,而西部内陆地区人口数量较低,且在2010年和2020年表现出沿海经济发达区人口明显增多现象。若将人口与地形联系,则不能简单认为“地形越低,人口越多”,而是在不同地形要素上表现出不同的区域人口分异特征。

## 2.2 地形梯度上人口数量分布与变化的概括性统计

基于预设梯度分段开展统计分析是已有相关研究的常用分析方式。为方便衔接和对比,本文对接已有梯度分段方案,并基于数据本身分布情况加

以扩展,分别将3类地形因子梯度划分为10个主要分段。其中海拔综合对接多个文献的分段方案(以200、500、1000、2000、3000、4000 m为断点)<sup>[9,29]</sup>,起伏度为对照海拔分段下人口频率分布情况的自设分段,坡度对接全国国土调查所使用的耕地坡度分级方案(以2°、6°、15°和25°为断点)。统计参数为3个年份(2000、2010和2020年)人口数量和土地面积在各分段的占比情况(表1)。

从表1中3个年份的数据可看出,全国人口在不同地形因子梯度上各自保持着相对稳定的分布比例,并且以低值区段集聚为特征。具体地,海拔梯度上,100 m以下集中了约半数人口,60%以上的人口分布在200 m以下,近80%的人口分布在500 m以下,近98%的人口分布在2000 m以下;起伏度梯度上,约半数人口分布于50 m以下,约80%的人口分布在200 m之下,99%以上的人口分布在750 m之下;坡度梯度上,约70%的人口集中在6°以内,接近95%的人口分布于20°以内,在25°之上还分布着



注:本图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为GS(2016)1549号的标准地图制作,底图无修改。

图1 中国地形与人口数量的空间分布

Fig.1 Spatial distribution of topography and population in China

表1 基于地形梯度分段的土地面积和人口数量统计

Tab.1 Statistics of land area and population based on terrain gradient sections (%)

地形因子	分段	2000年人口		2010年人口		2020年人口		土地	
		占比	累积占比	占比	累积占比	占比	累积占比	占比	累积占比
海拔	<20 m	19.72	19.72	21.24	21.24	22.97	22.97	3.15	3.15
	20~<50 m	17.81	37.53	17.93	39.17	17.93	40.90	3.54	6.69
	50~<100 m	12.91	50.44	13.10	52.27	13.06	53.96	3.44	10.13
	100~<200 m	11.62	62.06	11.69	63.96	11.50	65.46	5.69	15.82
	200~<500 m	16.65	78.71	15.45	79.41	14.37	79.83	12.07	27.89
	500~<1000 m	9.32	88.03	8.77	88.18	8.42	88.25	15.89	43.78
	1000~<2000 m	9.72	97.75	9.62	97.80	9.51	97.76	24.61	68.39
	2000~<3000 m	1.77	99.52	1.70	99.50	1.69	99.45	5.96	74.35
	3000~<4000 m	0.27	99.79	0.29	99.79	0.30	99.75	5.82	80.17
起伏度	≥4000 m	0.21	100.00	0.21	100.00	0.25	100.00	19.83	100.00
	<10 m	3.08	3.08	2.87	2.87	2.72	2.72	2.07	2.07
	10~<20 m	21.32	24.40	21.38	24.25	21.32	24.04	9.80	11.87
	20~<50 m	24.60	49.00	25.79	50.04	26.86	50.90	14.97	26.84
	50~<100 m	15.17	64.17	15.67	65.71	15.86	66.76	13.04	39.88
	100~<200 m	14.84	79.01	15.04	80.75	14.84	81.60	14.83	54.71
	200~<300 m	8.90	87.91	8.58	89.33	8.29	89.89	12.09	66.80
	300~<500 m	8.25	96.16	7.37	96.70	6.96	96.85	15.77	82.57
	500~<750 m	3.00	99.16	2.56	99.26	2.42	99.27	10.80	93.37
坡度	750~<1000 m	0.64	99.80	0.56	99.82	0.55	99.82	4.40	97.77
	≥1000 m	0.20	100.00	0.18	100.00	0.18	100.00	2.23	100.00
	<2°	28.36	28.36	28.58	28.58	28.39	28.39	17.83	17.83
	2°~<4°	30.14	58.50	31.92	60.50	33.13	61.52	20.18	38.01
	4°~<6°	8.84	67.34	9.35	69.85	9.56	71.08	7.73	45.74
	6°~<9°	7.79	75.13	7.84	77.69	7.69	78.77	7.86	53.60
	9°~<12°	5.67	80.80	5.51	83.20	5.29	84.06	6.63	60.23
	12°~<15°	5.13	85.93	4.75	87.95	4.53	88.59	6.56	66.79
	15°~<20°	7.20	93.13	6.29	94.24	5.95	94.54	11.37	78.16
	20°~<25°	4.28	97.41	3.59	97.83	3.39	97.93	9.73	87.89
	25°~<30°	1.83	99.24	1.52	99.35	1.45	99.38	6.88	94.77
	≥30°	0.76	100.00	0.65	100.00	0.62	100.00	5.23	100.00

超过2%的人口。

随时间变化,一些地形因子分段(以低值区段为主)的人口占比也在小幅持续增加(表1),由此缓慢地改变着人口在地形梯度上的比例分配。在海拔梯度上,人口比例增长最突出的是20 m以下,研究时段内共增长了3.25个百分点,年均0.16%,这与同一时期水平方向上人口向沿海地区集聚的现象是相互印证的<sup>[6]</sup>;海拔3000 m以上各分段也有微小的人口占比增加,研究时段内共增长了0.07个百分点,大致对应着近100万人,这主要是由于这一时期青藏高原地区相对更快的人口自然增长<sup>[6]</sup>。在起伏度梯度上,人口占比增长集中于20~100 m各分段,共增长了2.95个百分点。在坡度梯度上,人口占比增长集中于2°~6°各分段,共增长了3.71个百分点。

土地面积在各地形因子梯度上的分布均明显区别于人口,且共同表现出在地形较低区段占相对劣势,在地形较高区段占相对优势的特征(表1)。以海拔为例,大致以500 m为界,此海拔以下属人口占优,其上则以土地占优。同理,在起伏度梯度和坡度梯度上,人口与土地的优劣势分界分别位于200 m附近和6°附近。

综上,人口数量自身在地形梯度上的分布呈现出既相对稳定又逐渐增强的低地形指向性,而人口数量相对于土地面积的地形梯度分布主要体现为

逐渐增强的低地形优势性。鉴于仅根据表1难以进行更精细的识别,后文将分别围绕此“双低”特性,基于精细的等间隔梯度分级,借助一系列频率分析方法展开更细致的定量探查。

2.3 人口数量分布与变化的低地形指向性

基于20 m海拔间隔、10 m起伏度间隔和0.2°坡度间隔,图2显示了3个年份(2000、2010、2020年)人口在3个地形因子(海拔、起伏度、坡度)梯度上的频率分布和频率累加分布。从频率分布曲线形态上可直观看出两个特征:一是同一地形梯度上不同年份两两之间的频率分布曲线高度相似(表2),表明人口在地形梯度上的比例分配总体具有高度稳定性;二是所有频率分布曲线均呈现突出的右偏形态,直观证实了人口分布的低地形指向性。当然,在起伏度过小(<10 m,图2b)或坡度过缓(<1.6°,图2c)的梯度区间,因局部地形低洼易涝,人口比例也较小,说明人口分布的低地形指向性是相对的。更细致地,当基于海拔1 m、起伏度1 m和坡度0.01°的梯度间隔进行观察时,人口数量分布峰值依次稳定地位于4 m、12 m和1.77°处。

从频率累加分布曲线形态看(图2),所有曲线均

表2 地形梯度上不同年份人口频率分布曲线间叠合度  
Tab.2 Overlapping degree between population frequency distribution curves of different years on terrain gradients

地形因子	$S_{2010\&2000}$	$S_{2020\&2010}$	$S_{2020\&2000}$
海拔	0.978	0.979	0.959
起伏度	0.979	0.985	0.966
坡度	0.972	0.983	0.956

朝左上角凸起,并且该凸起特征是随时间变化而增强的,这是判定人口分布存在逐渐增强的低地形指向性的直观标志。表3进一步从累加关键值视角进行了统计,其中的半数平衡点( $F_{50\%}$ )和主流上限点( $F_{95\%}$ )位置示意图2。总的来说,大部分累加关键值随时间变化而下降,体现出人口向低地形区段迁移的大趋势。以 $F_{50\%}$ 和 $F_{95\%}$ 为例,2000—2020年,海拔、起伏度和坡度梯度上的 $F_{50\%}$ 分别从95.6 m、50.7 m和3.01°下降到77.0 m、46.8 m和2.88°,降幅分别为18.6 m、3.9 m和0.13°,而 $F_{95\%}$ 的降幅分别为14.9 m、34.9 m和1.25°。

为进一步探明人口低地形指向性的增强趋势是连续的还是波动的,选取人口半数平衡点 $F_{50\%}$ 作为代表,观察其逐年变化(图3)。可以发现,在全部地形因子梯度上, $F_{50\%}$ 均稳定地近线性下降,证实人口低地形指向性的增强趋势是连续的。

2.4 人口数量分布与变化的低地形优势性

基于与图2相同的地形梯度间隔,绘制各地形因子梯度上3个年份人口与土地的频率差值分布曲线和频率差值累加分布曲线(图4),进而计算出人口主体优势分布上界(MU)及其主体优势率,借以解析地形梯度上人口数量分配与土地面积分配间的关系。图4中直观标示了MU的位置,它在3个年份均稳定地位于海拔520 m、起伏度137 m和坡度6.84°附近,表明地形梯度上人口数量相对土地面积的优势/劣势转换点位置具有较强固定性。与MU对应的主体优势率则持续小幅上升(图5),在海拔、起伏度和坡度梯度上的主体优势率分别从2000年的

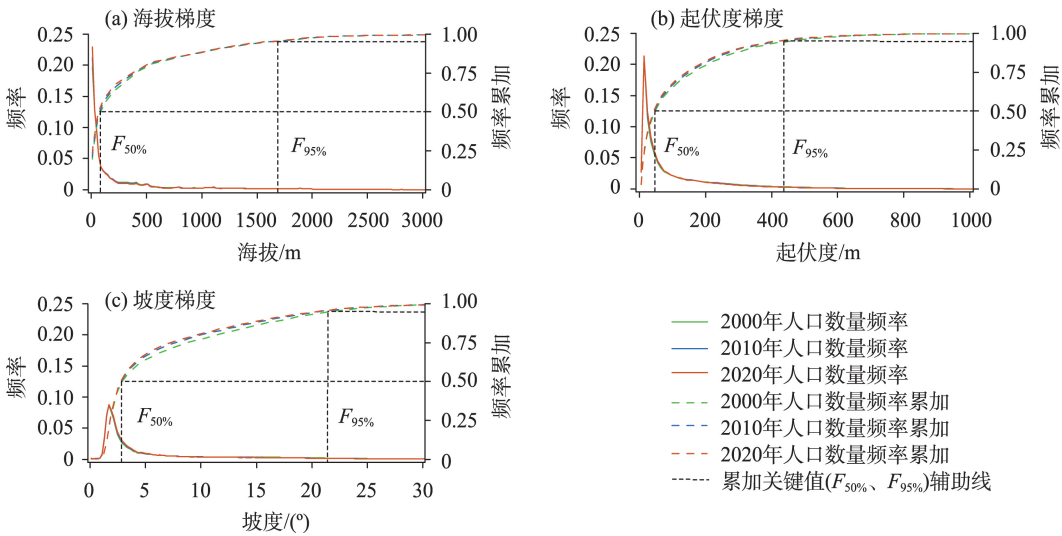


图2 地形梯度上的人口频率分布及频率累加分布

Fig.2 Distribution of frequency and cumulative frequency of population on terrain gradients

表3 人口数量在地形梯度上的主要累加关键值  
Tab.3 Cumulative key values for population on terrain gradients

关键累加位置	海拔累加关键值/m				起伏度累加关键值/m				坡度累加关键值/(°)			
	2000年	2010年	2020年	趋势	2000年	2010年	2020年	趋势	2000年	2010年	2020年	趋势
$F_{10\%}$	5.8	5.3	4.8	↘	11.4	11.5	11.6	↗	1.53	1.54	1.55	↗
$F_{20\%}$	19.0	16.4	14.0	↘	15.8	15.9	16.1	↗	1.77	1.77	1.78	↗
$F_{30\%}$	34.2	31.7	29.1	↘	22.7	22.7	22.6	↘	2.03	2.02	2.03	↘
$F_{40\%}$	54.5	50.4	46.5	↘	33.6	32.9	32.4	↘	2.39	2.36	2.36	↘
$F_{50\%}$	95.6	84.9	77.0	↘	50.7	48.4	46.8	↘	3.01	2.91	2.88	↘
$F_{60\%}$	175.0	154.7	141.3	↘	80.6	75.3	71.6	↘	4.25	3.91	3.78	↘
$F_{70\%}$	325.8	299.1	276.5	↘	130.6	120.7	114.9	↘	6.86	6.03	5.68	↘
$F_{80\%}$	529.8	509.4	501.4	↘	207.9	191.9	184.0	↘	11.53	10.15	9.63	↘
$F_{90\%}$	1110.6	1104.7	1100.4	↘	333.1	309.9	300.4	↘	17.61	16.42	16.02	↘
$F_{95\%}$	1601.7	1589.6	1586.8	↘	454.4	428.2	419.5	↘	21.74	20.77	20.49	↘
$F_{99\%}$	2402.3	2403.0	2439.0	↗	719.3	697.8	693.0	↘	28.95	28.30	28.15	↘
$F_{99.9\%}$	4523.4	4489.3	4603.4	↗	1110.3	1097.8	1097.4	↘	36.15	35.79	35.70	↘

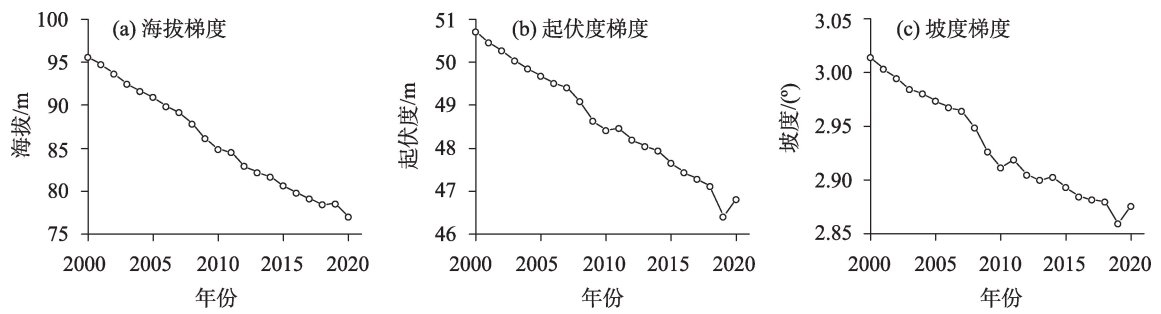


图3 地形梯度上的人口半数平衡点  
Fig.3 Location of the half-balance points of population on terrain gradients

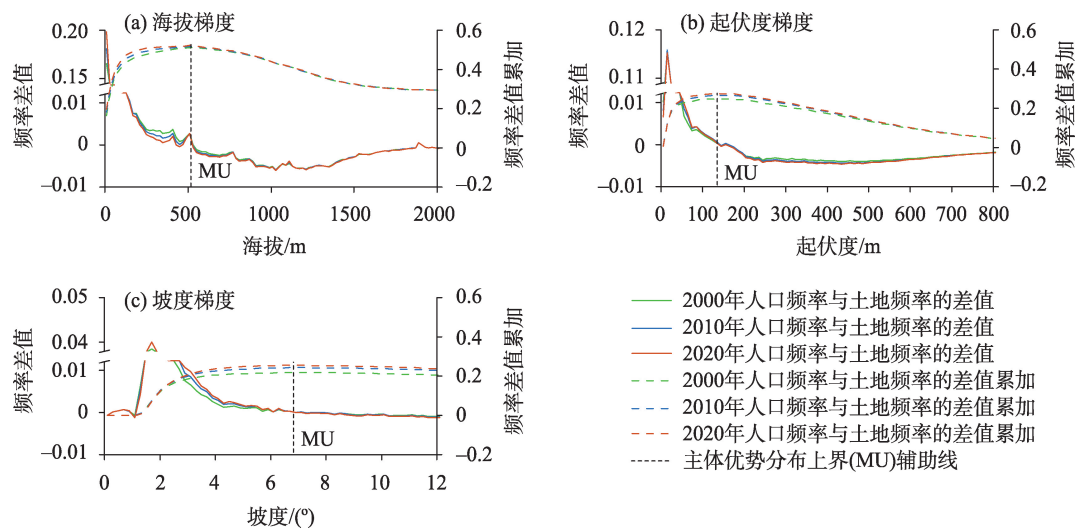


图4 地形梯度上人口相对土地分布差异  
Fig.4 Frequency difference of population relative to land on terrain gradients

0.511、0.248 和 0.217, 上升至 2020 年的 0.522、0.274 和 0.255, 升幅分别为 0.011、0.026 和 0.038, 表明人口分布相对于土地分布的低地形优势性在逐渐增强。

**2.5 数据不确定性分析**  
为明晰数据源差异对分析结果可能产生的影响, 从 3 个角度开展 4 组对照实验。每组对照实验



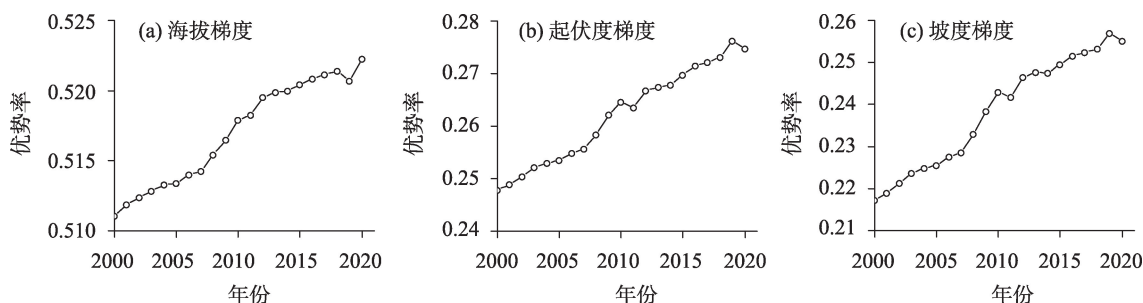


图5 地形梯度上人口主体优势率逐年变化

Fig.5 Change of the maximum frequency of population year by year on terrain gradients

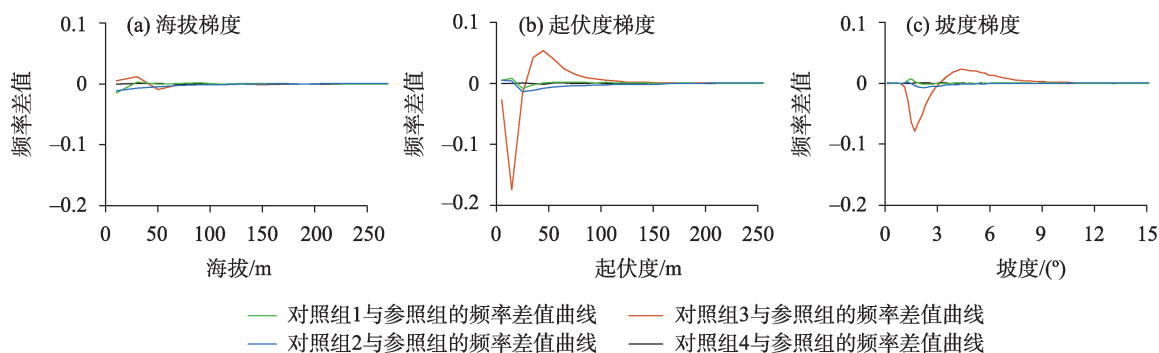
均以文中实际选用的 30 m 分辨率 SRTMGL1 数据和 2020 年 1 km 分辨率 WorldPop 数据作为参照,并且只对比 2020 年的人口数据。其中,角度 1 旨在比较不同人口数据源差异(LandScan 和 GPW 分别与 WorldPop)的影响,对应对照实验 1 和实验 2;角度 2 旨在比较不同 DEM 数据源差异(ASTER GDEM 与 SRTMGL1)的影响,对应对照实验 3;角度 3 旨在比较同一人口数据源和 DEM 数据源下不同统计单元差异(100 m 与 1 km)的影响,对应对照实验 4。

图 6 绘制了频率差值分布曲线,直观展示每组对比的差异部分在不同地形因子梯度上的分布情况。结果显示:① 角度 1 下用 3 种不同来源人口数据得到的频率分布十分接近,说明这 3 种人口数据对本文而言并无明显优劣之分;② 角度 2 下两种 DEM 数据源在海拔梯度上没有明显差异(图 6a),但在起伏度梯度(图 6b)和坡度梯度(图 6c)上却差异明显,这是因为 ASTER GDEM 数据的固有缺陷,即在平坦地区普遍存在颗粒效应<sup>[47]</sup>,导致由其生成的微观地形因子出现明显误差;③ 角度 3 下人口数据用 100 m 网格和用 1 km 网格得到的频率分布非常接

近,这可能是由于人口空间化技术尚难以兼顾大范围和高精度双重要求,以致全国尺度下 100 m 分辨率下的数据精度并不会明显优于 1 km 分辨率。总之,若仅分析人口数量的海拔分布问题,可以不考虑数据源差异;若要分析起伏度梯度和坡度梯度上的人口数量分布,应重视不同 DEM 数据源差异带来的影响。

### 3 讨论

本文结果表明,地形梯度上全国人口数量分布具有既相对稳定又逐渐增强的“两低”特性,即低地形指向性和低地形优势性。事实上这两个特性并非首次被提及,早在 1984 年就有研究指出中国绝大多数人口集中在较为低平的地区<sup>[9]</sup>,随后的研究在不同空间尺度下也得出了相同的指向性结论<sup>[11-16]</sup>。就全国性的研究而言,本文与现有研究相比主要在如下方面有所增益:① 采用了更新近(2000 年以来)、更精准(公里网格)的基础数据,开展了更细化、更系统的分析,获得了更精细定量的结果;② 既在



注:参照组数据为 30 m SRTMGL1 和 1 km WorldPop;对照组 1 数据为 30 m SRTMGL1 和 1 km LandScan;对照组 2 数据为 30 m SRTMGL1 和 1 km GPW;对照组 3 数据为 30 m ASTER GDEM 和 1 km WorldPop;对照组 4 数据为 30 m SRTMGL1 和 100 m WorldPop。

图6 对照实验差值分布曲线

Fig.6 Distribution curve of frequency difference for control experiments



前人较多研究的海拔梯度分布方面有所继承和拓展,又在前人较少关注的起伏度和坡度梯度分布方面提供了新的基础数据;③开展了跨度达20年的连续性对比,发现该“两低”特性总体在持续增强;④对比了几种主流数据源,明晰了数据源差异可能带来的影响。

联系相关研究,上述“两低”特性的增强趋势或许已持续了更长时间。表4列出了本文与2篇研究文献<sup>[8-9]</sup>的对比。这两篇文献均来自同一作者群体,且它们的土地面积占比构成相同,可认为两者的数据具有直接可比性。经对比这两篇文献的人口构成可发现,1981—1990年,海拔200 m以下区段人口占比在上升,同时海拔200 m以上区段人口占比在下降,也即人口分布的低海拔指向性在增强。本文也发现了相同的趋势。尽管由于数据源和统计方式存在差异,本文无法与这两篇文献直接衔接,但有理由相信,低海拔指向性的增强趋势应是连续且长期的,估计至少已持续了40年(1981—2020年)。再联系本文新增的起伏度和坡度因子,同样的趋势也应持续了至少40年。

本文结果显示,人口相对土地的主体优势分布上界(MU)稳定地位于海拔520 m、起伏度137 m和坡度6.84°附近。正如“胡焕庸线”简明揭示了中国稳固存在的水平空间宜居性分异那样,这些保持稳定的MU值很可能也对应着某种固有的地形宜居性分异。考虑到数据误差的影响,同时为方便推广,可将它们就近取整到海拔500 m、起伏度140 m和坡度7°的位置。这些MU值与现有一些研究可相互印证,例如海拔MU值(500 m)对应着人居环境适宜性评价研究中常用的中国基准山体高度<sup>[19]</sup>,坡度MU值(7°)对应着地貌分类研究中常用的平原/台地与山地/丘陵分界线<sup>[52]</sup>。以MU值为参考,或将有利于更统一地解析诸如中国历史上的民族迁徙、新中国成立初期的三线建设、改革开放以来的向海大迁移、21世纪初的西部大开发、近年来的低丘缓坡

开发等与地形梯度有关的大区域性人文事件。此外,MU值还可作为制定未来人口空间再分配政策的参考值。

以MU值(海拔500 m、起伏度140 m和坡度7°)为界,2000—2020年,中国人口占比在低海拔区段增长了1.12个百分点(从78.71%到79.83%),在低起伏度区段增长了2.68个百分点(从71.19%到73.87%),在低坡度区段增长了3.78个百分点(从70.34%到74.12%),增量依次扩大。换言之,从人口迁移的数量规模看,低海拔的吸引力远不如低起伏度和低坡度,而低起伏度又明显不如低坡度。考虑到海拔、起伏度和坡度依次属于宏观、中微观和微观地形因子,这意味着从人口迁移动机的解释力方面看,微观地形因子强于宏观地形因子。作为微观地形因子的起伏度和坡度实质是通过影响人类活动的便利程度而影响人口分布的,因而人口总是更多分布在地形较为平坦的区域。随着经济社会发展,人类对便利性的追求有增无减,这种内驱力不断推动地形相对崎岖区域的人口向地形更平坦区域迁移。当然,也不能排除少数一些区域因特殊的政策指向或产业发展定位而在地形梯度上出现反常的人口分布和流动现象,但这对全国性的分布与变化规律不会构成实质性影响。

21世纪以来在快速城镇化带动下的人口大迁移,是中国历史上最重要的大规模人口迁徙事件之一,从本研究看它确实对人口在地形梯度上的分布格局产生了一些影响。若以总人口14亿人进行概略换算,2000—2020年间低海拔区段、低起伏度区段和低坡度区段分别增长了1568万人、3752万人和5292万人。当然,这些数字仍明显小于该时期高达1.5亿人的新增人口数(人口普查的2000年和2020年总人口分别为12.67亿和14.12亿),更是显著小于乡村减少的约3亿人口(人口普查2000、2020年乡村人口分别为8.08亿、5.10亿),说明人口的水平迁移规模远超垂直迁移规模。对广大山地区域

表4 海拔梯度上与相关文献中人口数量占比和土地面积占比的对比

Tab.4 Comparison of population frequencies and land area frequencies on elevation gradients with related literature (%)

海拔/m	文献[9]		文献[8]		本文		
	1981年人口占比	土地面积占比	1990年人口占比	土地面积占比	2000年人口占比	2020年人口占比	土地面积占比
<200	60.80	15.00	64.90	15.00	62.07	65.46	15.82
200~<500	18.90	10.20	17.20	10.20	16.65	14.37	12.07
500~<1000	9.10	16.90	7.70	16.90	9.32	8.42	15.89
1000~<2000	9.10	25.00	8.90	25.00	9.71	9.51	24.61
≥2000	2.10	32.90	1.40	32.90	2.25	2.24	31.61

而言,这意味着区域内的总体人口压力并未大幅缓解,而是更多从山区农村就近转移到了山区城镇,即就近腾挪。

当前山区的城镇化水平仍明显落后于平原地区,山区快速城镇化还将持续较长时间,而宜建平地的日益缺乏正困扰着众多山区城镇<sup>[53-58]</sup>,若仅依靠山区内部就近腾挪,难以获得最优解,有必要在全国范围内开展综合协调。为更主动有效地消纳这部分新增城镇人口,本文给出两点建议:一是开展山区内部的跨区域协调。优选布局若干发展潜力更好的山区城镇,在节约集约用地和不破坏重要生态系统的前提下,继续积极稳妥推动低丘缓坡开发建设<sup>[59]</sup>,同时配套出台耕地、生态用地、建设用地等指标的跨区域统筹调剂置换政策。二是开展山区与平原区的跨区域协调。借助平原地区用地效益明显高于山区的比较优势,积极引导山区尤其是脱贫深山区人口向平原地区迁移落户。可以预见,上述两种跨区域协调方式都将继续强化地形梯度上人口分布的“两低”特性。

本文仅分别从3个地形因子梯度视角开展统计分析,尚未考虑地形因子间的交互问题,也未进一步探讨人口水平空间分布与地形因子关系的时空分异问题。此外,有关地形因子的选择、计算、分级等也有待进一步深化研究。

## 4 结论

本文以公里网格人口数据分析了2000—2020年间中国人口在海拔、起伏度以及坡度梯度上的分布格局与变化趋势,主要结论为:

(1) 人口数量分布具有强烈且持续小幅增强的低地形指向性。全国人口在地形梯度上保持着相对稳定的分布比例,低地形区段集中了大部分人口,当基于海拔1 m、起伏度1 m和坡度0.01°的梯度间隔进行观察时,人口数量分布峰值依次稳定地位于4 m、12 m和1.77°处。在2000年,全国半数人口分布在海拔95.6 m、起伏度50.7 m和坡度3.01°之下,到2020年,此人口半数平衡点下降至海拔77.0 m、起伏度46.8 m和坡度2.88°,降幅分别为18.6 m、3.9 m和0.13°,说明人口的低地形指向性在持续增强。

(2) 人口数量分布相对土地面积分布而言具有范围稳定且持续小幅增强的低地形优势性。低地

形区段是人口相对土地的优势分布区段,高地形区段是人口相对土地的劣势分布区段,人口主体优势分布上界(MU)是两者发生转换的位置,该位置在研究时段内分别较稳定地位于海拔520 m、起伏度137 m和坡度6.84°附近。海拔、起伏度和坡度梯度上的人口主体优势率分别从2000年的0.511、0.248和0.217,持续上升至2020年的0.522、0.274和0.255,表明人口的低地形优势性在持续增强。

(3) 就数据差异对人口在地形梯度上的分布与变化规律有无明显影响而言,在相同DEM数据集下,不同人口数据集(WorldPop、LandScan和GPW)的差异不明显;在相同人口数据集下,不同DEM数据集(ASTER GDEM和SRTMGL1)在起伏度梯度上和坡度梯度上均有明显不同,而在海拔梯度上差别很小;在DEM和人口数据均相同的前提下,公里网格与百米网格的表现高度一致。

## 参考文献(References)

- [1] 张果,李玉江. 人口地理学 [M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2017: 136-138. [Zhang Guo, Li Yujang. Population geography. 2nd ed. Beijing, China: Science Press, 2017: 136-138.]
- [2] 朱宇,丁金宏,王桂新,等. 近40年来的中国人口地理学: 一个跨学科研究领域的进展 [J]. 地理科学进展, 2017, 36(4): 466-482. [Zhu Yu, Ding Jinhong, Wang Guixin, et al. Research progress on population geography in China in recent 40 years: A cross-disciplinary perspective. Progress in Geography, 2017, 36(4): 466-482.]
- [3] Körner C, Urbach D, Paulsen J. Mountain definitions and their consequences [J]. Alpine Botany, 2021, 131(2): 213-217.
- [4] Ehrlich D, Melchiorri M, Capitani C. Population trends and urbanisation in mountain ranges of the world [J]. Land, 2021, 10(3): 255. doi: 10.3390/land10030255.
- [5] 邓伟,唐伟. 试论中国山区城镇化方向选择及对策 [J]. 山地学报, 2013, 31(2): 168-173. [Deng Wei, Tang Wei. General directions and countermeasures for urbanization development in mountain areas of China. Journal of Mountain Science, 2013, 31(2): 168-173.]
- [6] 刘涛,彭荣熙,卓云霞,等. 2000—2020年中国人口分布格局演变及影响因素 [J]. 地理学报, 2022, 77(2): 381-394. [Liu Tao, Peng Rongxi, Zhuo Yunxia, et al. China's changing population distribution and influencing factors: Insights from the 2020 census data. Acta Geographica Sinica, 2022, 77(2): 381-394.]
- [7] 程梦瑶. 迈向高质量发展: 基于“七普”数据考察我国人

- 口城镇化新阶段[J]. 人口与发展, 2022, 28(2): 93-103, 57. [Cheng Mengyao. Moving forward into quality-oriented development: A preliminary study on China's urbanization from the seventh national population census. *Population & Development*, 2022, 28(2): 93-103, 57. ]
- [8] 张善余. 人口垂直分布规律和中国山区人口合理再分布研究[M]. 上海: 华东师范大学出版社, 1996: 8-30. [Zhang Shanyu. Study on vertical distribution of population and rational redistribution of population in mountainous areas. Shanghai, China: East China Normal University Press, 1996: 8-30. ]
- [9] 胡焕庸, 张善余. 中国人口地理: 上册[M]. 上海: 华东师范大学出版社, 1984: 220-225. [Hu Huanyong, Zhang Shanyu. Population geography of China: Volume I. Shanghai, China: East China Normal University Press, 1984: 220-225. ]
- [10] Cohen J E, Small C. Hypsographic demography: The distribution of human population by altitude [J]. *PNAS*, 1998, 95(24): 14009-14014.
- [11] 陈浩, 董廷旭, 李勇, 等. 基于海拔高程的四川省少数民族自治州人口格局演化研究[J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34(11): 84-90. [Chen Hao, Dong Tingxu, Li Yong, et al. Evolution of population patterns in the ethnic autonomous prefectures of Sichuan Province based on altitude. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2020, 34(11): 84-90. ]
- [12] 罗君, 石培基, 张学斌. 黄河上游兰西城市群人口时空特征多维透视[J]. 资源科学, 2020, 42(3): 474-485. [Luo Jun, Shi Peiji, Zhang Xuebin. Spatiotemporal characteristics of population distribution in the upper reaches of the Yellow River: A multi-dimensional approach in the Lanzhou-Xining urban agglomeration. *Resources Science*, 2020, 42(3): 474-485. ]
- [13] Ma C Q, He Y F. Spatiotemporal trends and ecological determinants in population by elevation in China since 1990 [J]. *Chinese Geographical Science*, 2021, 31(2): 248-260.
- [14] Liu Y, Deng W, Song X Q. Relief degree of land surface and population distribution of mountainous areas in China [J]. *Journal of Mountain Science*, 2015, 12(2): 518-532.
- [15] 张静静, 朱文博, 朱连奇, 等. 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[J]. 地理学报, 2018, 73(6): 1093-1106. [Zhang Jingjing, Zhu Wenbo, Zhu Lianqi, et al. Spatial variation of terrain relief and its impacts on population and economy based on raster data in West Henan Mountain Area. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(6): 1093-1106. ]
- [16] 罗庆, 王冰冰, 樊新生, 等. 山区县人口分布的时空特征及主要影响因素分析: 以河南省嵩县为例[J]. 地理科学进展, 2020, 39(7): 1073-1084. [Luo Qing, Wang Bingbing, Fan Xinsheng, et al. Spatio-temporal change of population distribution and its influencing factors in a poor mountainous county: A case study of Song County, Henan Province. *Progress in Geography*, 2020, 39(7): 1073-1084. ]
- [17] 王志恒, 胡卓玮, 赵文吉, 等. 应用累积和分析算法的地形起伏度最佳统计单元确定[J]. 测绘科学, 2014, 39(6): 59-64. [Wang Zhiheng, Hu Zhuowei, Zhao Wenji, et al. Extracting optimum statistical unit for relief degree of land surface with CUSUM algorithm. *Science of Surveying and Mapping*, 2014, 39(6): 59-64. ]
- [18] 钟静, 卢涛. 中国西南地区地形起伏度的最佳分析尺度确定[J]. 水土保持通报, 2018, 38(1): 175-181, 186. [Zhong Jing, Lu Tao. Optimal statistical unit for relief amplitude in Southwestern China. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2018, 38(1): 175-181, 186. ]
- [19] 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[J]. 地理学报, 2007, 62(10): 1073-1082. [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. ]
- [20] 王利, 王慧鹏, 任启龙, 等. 关于基准地形起伏度的设定和计算: 以大连旅顺口区为例[J]. 山地学报, 2014, 32(3): 277-283. [Wang Li, Wang Huipeng, Ren Qilong, et al. Setting and calculation of basic topographic relief: A case study of Lvshunkou District of Dalian, China. *Mountain Research*, 2014, 32(3): 277-283. ]
- [21] 程东亚, 李旭东. 贵州省乌江流域人口分布与地形的关系[J]. 地理研究, 2020, 39(6): 1427-1438. [Cheng Dongya, Li Xudong. Relationship between population distribution and topography of the Wujiang River Watershed in Guizhou Province. *Geographical Research*, 2020, 39(6): 1427-1438. ]
- [22] 罗君, 石培基, 张学斌. 兰西城市群人口分布格局及其与地形要素的关系[J]. 经济地理, 2020, 40(6): 106-115. [Luo Jun, Shi Peiji, Zhang Xuebin. Relationship between topographic factors and population distribution in Lanzhou-Xining urban agglomeration. *Economic Geography*, 2020, 40(6): 106-115. ]
- [23] 何莎莎, 方斌. 基于栅格的安徽省人口—经济耦合关联及地形梯度差异[J]. 热带地理, 2021, 41(2): 351-363. [He Shasha, Fang Bin. Population-economy coupling and its effect on topographic gradients in Anhui Province, China based on a grid scale. *Tropical Geography*,



- 2021, 41(2): 351-363. ]
- [24] 刘洪鹄, 刘宪春, 赵晓辉. 东北漫岗区村落的分布特征分析 [J]. 生态与农村环境学报, 2006, 22(1): 15-19. [Liu Honghu, Liu Xianchun, Zhao Xiaohui. Characteristics of distribution of rural settlements in hilly area, Northeast China. Journal of Ecology and Rural Environment, 2006, 22(1): 15-19. ]
- [25] 赵彤彤, 宋邦国, 陈远生, 等. 西藏一江两河地区人口分布与地形要素关系分析 [J]. 地球信息科学学报, 2017, 19(2): 225-237. [Zhao Tongtong, Song Bangguo, Chen Yuansheng, et al. Analysis of population distribution and its spatial relationship with terrain elements in the Yarlung Zangbo River, Nyangqu River and Lhasa River Region, Tibet. Journal of Geo-information Science, 2017, 19(2): 225-237. ]
- [26] 王学义, 曾永明. 中国川西地区人口分布与地形因子的空间分析 [J]. 中国人口科学, 2013, 27(3): 85-93, 128. [Wang Xueyi, Zeng Yongming. Research on population distribution and terrain factors based on spatial econometric modeling in Chuanxi area of China. Chinese Journal of Population Science, 2013, 27(3): 85-93, 128. ]
- [27] 焦贝贝, 石培基, 刘春芳, 等. 黄土高原低山丘陵区农村居民点分布与地形因子关系研究: 以兰州市七里河区为例 [J]. 资源科学, 2013, 35(8): 1719-1727. [Jiao Beibei, Shi Peiji, Liu Chunfang, et al. The distribution of rural settlements in relation to land form factors in low hilly land on the Loess Plateau. Resources Science, 2013, 35(8): 1719-1727. ]
- [28] 罗娅, 杨建红, 周秋文, 等. 贵州高原山区正负地形特征及其对人口分布的影响 [J]. 世界地理研究, 2021, 30(1): 204-212. [Luo Ya, Yang Jianhong, Zhou Qiuwen, et al. Characteristic of positive and negative terrains and its effect on population distribution in the mountainous area, Guizhou Plateau. World Regional Studies, 2021, 30(1): 204-212. ]
- [29] 吕晨, 樊杰, 孙威. 基于ESDA的中国人口空间格局及影响因素研究 [J]. 经济地理, 2009, 29(11): 1797-1802. [Lv Chen, Fan Jie, Sun Wei. Population distribution and the influencing factors based on ESDA. Economic Geography, 2009, 29(11): 1797-1802. ]
- [30] 胡焕庸. 中国人口之分布: 附统计表与密度图 [J]. 地理学报, 1935, 2(2): 33-74. [Hu Huanyong. Distribution of population in China: Attached with statistical table and density map. Acta Geographica Sinica, 1935, 2(2): 33-74. ]
- [31] 吴华意, 胡秋实, 李锐, 等. 城市人口时空分布估计研究进展 [J]. 测绘学报, 2022, 51(9): 1827-1847. [Wu Huayi, Hu Qiushi, Li Rui, et al. Research progress on spatio-temporal distribution estimation of urban population. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2022, 51(9): 1827-1847. ]
- [32] 郭子翰, 陈斐, 刘晓丽, 等. 基于土地利用类型提高人口格网数据空间精度的方法 [J]. 测绘通报, 2021(12): 66-70. [Guo Zihan, Chen Fei, Liu Xiaoli, et al. A method to improve the spatial accuracy of population grided data based on land use. Bulletin of Surveying and Mapping, 2021(12): 66-70. ]
- [33] 孟瑶, 李锐, 蒋捷, 等. 基于建筑物信息的城市街道尺度人口估算 [J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2021, 46(8): 1194-1200. [Meng Yao, Li Rui, Jiang Jie, et al. Urban street scale population estimation based on building information. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, 46(8): 1194-1200. ]
- [34] 韩用顺, 王文娟, 张东水, 等. 一种基于分区和识别真实居住区的人口空间化方法: 以雅砻江流域为例 [J]. 山地学报, 2022, 40(2): 303-316. [Han Yongshun, Wang Wenjuan, Zhang Dongshui, et al. A population spatialization method based on regional differentiations in population and actual housing vacancy: Taking the Yalong River Basin of China as an example. Mountain Research, 2022, 40(2): 303-316. ]
- [35] 吴献文, 速云中, 孙照辉. 夜间灯光数据支持下的广州市人口空间化 [J]. 测绘通报, 2021(5): 59-62. [Wu Xianwen, Su Yunzhong, Sun Zhaohui. Spatialization of population in Guangzhou supported by nighttime light data. Bulletin of Surveying and Mapping, 2021(5): 59-62. ]
- [36] 李慧敏, 罗大伟, 窦世卿. 利用腾讯位置大数据进行多尺度人口空间化估算 [J]. 测绘通报, 2022(6): 93-97. [Li Huimin, Luo Dawei, Dou Shiqing. The estimation of population on multi-spatial scale using Tencent location big data. Bulletin of Surveying and Mapping, 2022(6): 93-97. ]
- [37] 桂志鹏, 梅宇翔, 吴华意, 等. 顾及POI人口吸引力异质性的城市人口空间化方法 [J]. 地球信息科学学报, 2022, 24(10): 1883-1897. [Gui Zhipeng, Mei Yuao, Wu Huayi, et al. Urban population spatialization by considering the heterogeneity on local resident attraction force of POIs. Journal of Geo-information Science, 2022, 24(10): 1883-1897. ]
- [38] 谭敏, 刘凯, 柳林, 等. 基于随机森林模型的珠江三角洲30 m格网人口空间化 [J]. 地理科学进展, 2017, 36(10): 1304-1312. [Tan Min, Liu Kai, Liu Lin, et al. Spatialization of population in the Pearl River Delta in 30 m grids using random forest model. Progress in Geography, 2017, 36(10): 1304-1312. ]
- [39] 何艳虎, 龚镇杰, 林凯荣. 基于地理大数据和多源信息融合的区域未来人口精细化空间分布模拟研究: 以珠

- 江三角洲为例[J]. 地理科学, 2022, 42(3): 426-435. [He Yanhu, Gong Zhenjie, Lin Kairong. Simulation of fine spatial distribution of regional future population based on geographical big data and multisource fused method: A case of the Pearl River Delta. *Scientia Geographica Sinica*, 2022, 42(3): 426-435. ]
- [40] 柏中强, 王卷乐, 杨飞. 人口数据空间化研究综述[J]. 地理科学进展, 2013, 32(11): 1692-1702. [Bai Zhongqiang, Wang Juanle, Yang Fei. Research progress in spatialization of population data. *Progress in Geography*, 2013, 32(11): 1692-1702. ]
- [41] Lloyd C T, Sorichetta A, Tatem A J. High resolution global gridded data for use in population studies[J]. *Scientific Data*, 2017, 4: 170001. doi: 10.1038/sdata.2017.1.
- [42] Linard C, Alegana V A, Noor A M, et al. A high-resolution spatial population database of Somalia for disease risk mapping[J]. *International Journal of Health Geographics*, 2010, 9: 45. doi: 10.1186/1476-072X-9-45.
- [43] Bhaduri B, Bright E, Coleman P, et al. LandScan USA: A high-resolution geospatial and temporal modeling approach for population distribution and dynamics[J]. *GeoJournal*, 2007, 69: 103-117.
- [44] Bai Z Q, Wang J L, Wang M M, et al. Accuracy assessment of multi-source gridded population distribution datasets in China[J]. *Sustainability*, 2018, 10(5): 1363. doi: 10.3390/su10051363.
- [45] Xu Y M, Ho H C, Knudby A, et al. Comparative assessment of gridded population data sets for complex topography: A study of Southwest China[J]. *Population and Environment*, 2021, 42(3): 360-378.
- [46] 李鹏, 李振洪, 施闯, 等. 中国地区30 m分辨率SRTM质量评估[J]. 测绘通报, 2016(9): 24-28. [Li Peng, Li Zhenhong, Shi Chuang, et al. Quality evaluation of 1 arc second version SRTM DEM in China. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2016(9): 24-28. ]
- [47] 唐新明, 李世金, 李涛, 等. 全球数字高程产品概述[J]. 遥感学报, 2021, 25(1): 167-181. [Tang Xinming, Li Shijin, Li Tao, et al. Review on global digital elevation products. *National Remote Sensing Bulletin*, 2021, 25(1): 167-181. ]
- [48] 程维明, 周成虎, 柴慧霞, 等. 中国陆地地貌基本形态类型定量提取与分析[J]. 地球信息科学学报, 2009, 11(6): 725-736. [Cheng Weiming, Zhou Chenghu, Chai Huixia, et al. Quantitative extraction and analysis of basic morphological types of land geomorphology in China. *Journal of Geo-information Science*, 2009, 11(6): 725-736. ]
- [49] 张伟, 李爱农. 基于DEM的中国地形起伏度适宜计算尺度研究[J]. 地理与地理信息科学, 2012, 28(4): 8-12. [Zhang Wei, Li Ainong. Study on the optimal scale for calculating the relief amplitude in China based on DEM. *Geography and Geo-Information Science*, 2012, 28(4): 8-12. ]
- [50] 南希, 李爱农, 景金城. 中国山地起伏度计算中地形自适应滑动窗口获取与验证[J]. 地理与地理信息科学, 2017, 33(4): 34-39, 2. [Nan Xi, Li Ainong, Jing Jincheng. Calculation and verification of topography adaptive slide windows for the relief amplitude solution in mountain areas of China. *Geography and Geo-Information Science*, 2017, 33(4): 34-39, 2. ]
- [51] 彭秋志, 唐铃, 陈杰, 等. 2000—2015年深圳市建设用地坡谱演变研究[J]. 自然资源学报, 2018, 33(12): 2200-2212. [Peng Qiuzhi, Tang Ling, Chen Jie, et al. Study on the evolution of construction land slope spectrum in Shenzhen during 2000-2015. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(12): 2200-2212. ]
- [52] 周成虎, 程维明, 钱金凯, 等. 中国陆地1:100万数字地貌分类体系研究[J]. 地球信息科学学报, 2009, 11(6): 707-724. [Zhou Chenghu, Cheng Weiming, Qian Jinkai, et al. Research on the classification system of digital land geomorphology of 1:1000000 in China. *Journal of Geo-information Science*, 2009, 11(6): 707-724. ]
- [53] 周亮, 党雪薇, 周成虎, 等. 中国建设用地的坡谱演化规律与爬坡影响[J]. 地理学报, 2021, 76(7): 1747-1762. [Zhou Liang, Dang Xuewei, Zhou Chenghu, et al. Evolution characteristics of slope spectrum and slope-climbing effects of built-up land in China. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(7): 1747-1762. ]
- [54] Zhou L, Dang X W, Mu H W, et al. Cities are going uphill: Slope gradient analysis of urban expansion and its driving factors in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 775: 145836. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.145836.
- [55] 彭秋志, 马少华, 邓启辉, 等. 山地城市建设用地增长的坡度梯度效应: 以贵阳市为例[J]. 自然资源学报, 2022, 37(7): 1865-1875. [Peng Qiuzhi, Ma Shaohua, Deng Qihui, et al. Relationship between construction land and slope in rapidly expanding mountain cities: A case study in Guiyang, China. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(7): 1865-1875. ]
- [56] 马经纬, 彭秋志, 马少华, 等. 中国城市建设用地坡地率及其与地面坡地率的关联[J]. 资源开发与市场, 2022, 38(8): 948-954, 972. [Ma Jingwei, Peng Qiuzhi, Ma Shaohua, et al. Proportion of sloping land in construction land and its correlation with proportion of sloping land in land for cities in China. *Resource Development & Market*, 2022, 38(8): 948-954, 972. ]
- [57] Yang C, Guo W H, Zhang C C, et al. Characteristics and

- trends of hillside urbanization in China from 2007 to 2017 [J]. *Habitat International*, 2022, 120: 102502. doi: 10.1016/j.habitatint.2021.102502.
- [58] 姜跃锋, 周亮, 陈志杰. 典型河谷型城市建设用地的爬坡特征及其生态质量影响 [J]. *山地学报*, 2022, 40(4): 570-580. [Jiang Yuefeng, Zhou Liang, Chen Zhijie. Slope-climbing characteristics of typical valley-type urban construction land and its ecological quality influence. *Mountain Research*, 2022, 40(4): 570-580. ]
- [59] 彭秋志, 朱丹. 中国建设用地爬坡潜在重点县域识别与分析 [J]. *中国土地科学*, 2022, 36(9): 102-110. [Peng Qiuzhi, Zhu Dan. Identification and analysis of potential key counties for slope-climbing construction land in China. *China Land Science*, 2022, 36(9): 102-110. ]

## Distribution and change of China's population on the terrain gradients from 2000 to 2020

PENG Qiuzhi<sup>1,2,3</sup>, HUANG Peiyi<sup>1</sup>, CHEN Di<sup>1</sup>, ZHU Dan<sup>1</sup>

(1. Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China; 2. Surveying and Mapping Geo-informatics Technology Research Center on Plateau Mountains of Yunnan Higher Education Institutions, Kunming 650093, China; 3. Yunnan Natural Resources and Planning Intelligence Innovation Laboratory, Kunming 650093, China)

**Abstract:** One of the basic topics in population geography is how the population distributes and changes on terrain gradients. With the improvement of data accuracy and quality, it is feasible to conduct macroscopic analysis for this question based on kilometer grid cells. This study analyzed the distribution and change characteristics of China's population on the gradients of elevation, ruggedness, and slope from 2000 to 2020, using methods of frequency distribution statistics, based on 1-km grid statistical cells, and using spatial demographic datasets (WorldPop) and digital elevation model datasets (SRTMGL1). The effects of different digital elevation model datasets (including ASTER GDEM and SRTMGL1) and spatial demographic datasets (including WorldPop, LandScan, and GPW) on the results were also compared and the differences between the 1-km grid and 100-meter grid data were further explored with SRTMGL1 and WorldPop. The results show that: 1) The population increasingly tends to be distributed at the lower position of terrain gradients. The half-balance points of the population distribution on elevation, ruggedness, and slope gradients were 95.6 m, 50.7 m, and 3.01° respectively in 2000, and decreased to 77.0 m, 46.8 m, and 2.88° in 2020. 2) Dominant area of population distribution relative to land area has been stably located at a lower position of terrain gradients. The upper boundary of the dominant part of the population over terrain (MU) is stably located at the elevation of 520 m, the ruggedness of 137 m, and the slope of 6.84°, respectively, and the population dominance rate rose from 0.511, 0.248, and 0.217 in 2000 to 0.522, 0.274, and 0.255 in 2020, respectively. 3) Different spatial demographic datasets have no effect on the distribution and change pattern of population on terrain gradients, while DEM datasets have significant effects on the ruggedness gradient and slope gradient distribution of population. There is no difference between 1-km grid and 100-meter grid data for this study, and the 1-km grid dataset is recommended for the study of population distribution at the national scale and above. This study provides a new basic reference for understanding of the relationship between population distribution and terrain in China at the kilometer grid scale.

**Keywords:** population; terrain gradients; elevation; ruggedness; slope; kilometer grid; China