

1980—2016年黄土高原地区人口和可达性异速标度分析

吕敏娟^{1,2,3,4}, 曹小曙^{2,3,4*}

(1. 陕西师范大学地理科学与旅游学院, 西安 710119; 2. 陕西师范大学自然资源与国土空间研究院, 西安 710119;
3. 陕西师范大学西北城镇化与国土环境空间模拟重点实验室, 西安 710119;
4. 黄土高原人地耦合系统观测站, 西安 710119)

摘要:论文基于黄土高原地区乡镇1980、1990、2000、2010、2016年5期截面数据,利用位序—规模法则和异速标度律,分析了乡镇尺度人口和可达性规模结构、等级体系及异速标度演化关系。结果表明:①人口规模以中小等级乡镇为主,60%的乡镇人口规模正增长,总体呈“南北高、中间低”分布格局;可达性水平总体呈明显上升趋势,空间上自东南向西北逐渐降低;河谷平原区人口规模和可达性均最大。②人口和可达性均呈位次型分布,人口位序—规模具有明显双分形结构,由均衡向极化转变;可达性位序—规模以2000年为转折点由双分形演变为单分形,由低水平均衡转向更高水平均衡。③3006个乡镇整体以正异速生长为主,负异速生长为辅,黄土高原沟壑区、河谷平原区内乡镇异速生长类型以人口增长正异速生长为主,黄土丘陵沟壑区、土石山区、沙地和沙漠区内乡镇以人口下降正异速生长为主,农灌区内乡镇异速生长以人口增长正异速一级和人口下降负异速一级为主。最后根据人口和可达性异速类型和空间分布特征,提出各分区发展的建议。

关键词:人口规模;可达性;位序—规模;异速标度;黄土高原地区

作为人口、生产要素等流通与联系的纽带,交通是影响其空间组织的关键因素。中心地理论和新经济地理都指出,运输成本在影响人口经济集聚方面呈现分散(均衡)—集聚(极化)—再分散(均衡)的过程。可达性对人口数量变化的影响存在促进人口增长、减少及不会影响3个结果,高速公路等级提升^[1]、铁路网络修建^[2]对人口增长有明显贡献,且随着时间推移,公路交通对人口变化的影响更为显著^[3-4]。Chi^[5]分析了美国威斯康辛州高速公路和机场可达性对人口变化的影响,发现在农村地区均促进人口增长,在郊区机场可达性促进人口增长而高速公路则会促进人口减少;Schwartz等^[6]发现高的铁路可达性会降低农村地区人口减少速度;Voss等^[7]却发现人口增长与高速公路是否修建没有必然关

系;Jiwattanakupaisarn等^[8]发现高速公路建设对就业人口集聚并无太大关系;Asher等^[9]认为交通对城市中心区人口增长的作用更强;王振波等^[10]认为对经济落后地区的人口集聚作用大于发达地区。此外,赵璟等^[11]、Soo^[12]以齐夫指数为因变量,均发现通过基础设施的联通可促进人口均衡发展。方法上以广义可加模型^[4]、空间滞后/误差模型^[13]、相关性分析^[10,14]为主。

位序—规模法则能够有效反映变量的集聚特征,在交通体系中运用不多,主要从港口吞吐量^[15]、客货运量^[16]、交通流^[17]角度进行验证,结果均符合位序—规模分布。异速标度律可以将空间分布、等级结构和动态演化联系起来,用来刻画2个不同要素之间或者单个要素相对于整体的相对增长率^[18]。

收稿日期:2019-11-06;修订日期:2020-06-01。

基金项目:国家自然科学基金重点项目(41831284)。[Foundation: Key Program of the National Natural Science Foundation of China, No. 41831284.]

第一作者简介:吕敏娟(1992—),女,山西晋城人,博士生,主要研究方向为乡村地理。E-mail: 18003431662@163.com

*通信作者简介:曹小曙(1970—),男,甘肃灵台人,博士,教授,主要研究方向为地理与规划。E-mail: caoxsh@snnu.edu.cn

引用格式:吕敏娟,曹小曙. 1980—2016年黄土高原地区人口和可达性异速标度分析[J]. 地理科学进展, 2020, 39(11): 1884-1897. [Lv Minjuan, Cao Xiaoshu. Allometric scaling analysis of population and accessibility on the Loess Plateau from 1980 to 2016. Progress in Geography, 2020, 39(11): 1884-1897.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2020.11.009

Bettercourt等^[19-20]解释了人口规模与城市经济之间的超线性规模效应,认为城市居民间的相互作用是增加超线性规模效应的原因,并得出美国大都市统计区的人口与道路总长呈亚线性关系,异速标度系数在0.85左右;王成新等^[21]发现道路交通设施用地与城市人口之间异速标度系数为1.248,呈超线性增长;Batty^[22-23]将其理论扩展到区域之间相互作用的空间规模经济,并用可达性指标表征相互作用程度,发现英格兰和威尔士地区人口和可达性之间呈超线性关系,异速标度系数为1.093。

黄土高原地区内部的不平衡性与不协调性越来越受到关注,现有研究对人口和可达性的均衡、非均衡分布演化,以及体系内部关系的解析不够深入。基于此,本文从人口和可达性规模的外在特征与内在联系2个方面,对1980—2016年黄土高原地区乡镇尺度人口和可达性规模特征及关系进行分析。其一,分析人口和可达性规模结构及变动特征;其二,利用位序—规模法则分析人口和可达性规模的非均衡演变;其三,基于异速标度律分析人口和可达性两者间的异速特征,以期揭示人口和可达性内部关系,促进黄土高原地区平衡、协调发展。

1 研究区域、数据与方法

1.1 研究区域与数据来源

根据中国科学院黄土高原综合科学考察队确定的“黄土高原地区”范围^[24],位于33°41'N~41°16'N、100°54'E~114°33'E之间,主要包括山西和宁夏两省(自治区)全部、陕西省大部,以及河南、甘肃、内蒙古和青海等省(自治区)部分地区,总面积63.5万km²,占全国土地总面积的6.6%。为更好地揭示其空间差异性和地域分异特征,根据《黄土高原地区综合治理规划大纲(2010—2030年)》,将其划分为河谷平原区、黄土丘陵沟壑区、黄土高塬沟壑区、农灌区、沙地和沙漠区和土石山区6个地理分区(图1)。

本文研究数据主要来源为:① 本文研究单元为乡镇,以民政部2016年行政区划为准,剔除县城所在的建制镇,根据各省份“撤乡并镇及行政区划调整公告”,合并各年份乡镇人口数据,最终得到1980年2980个乡镇;1990年的乡镇数据陕西等省份有缺失,仅包括1639个乡镇,故在分析中是以1980、2000、2010、2016年为主;2000年3000个乡镇;2010年3006个乡镇;2016年3006个乡镇行政单元。②

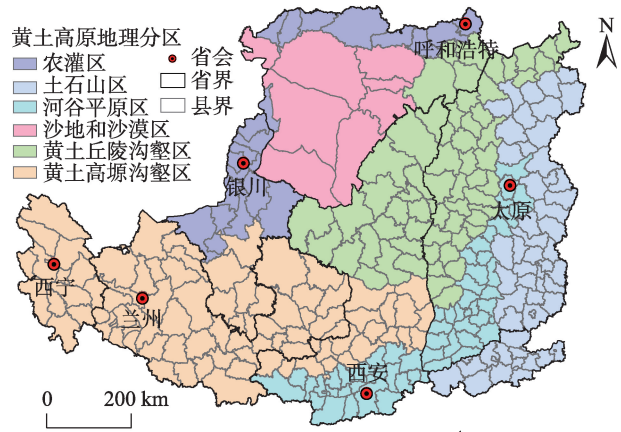


图1 黄土高原地理分区

Fig.1 Geographical regionalization of the Loess Plateau
乡镇常住人口原始数据来源于7个省区的第三、四、五、六次人口普查资料,如《山西省第三次人口普查手工汇总资料汇编》;2016年乡镇常住人口数据来源于《中国县域统计年鉴2017(乡镇卷)》^[25]。③ 交通网络数据由矢量化得到,包括中国地图出版社出版的《中国地图册(1981)》《中国交通图册(1990)》《新编中国交通图册(2000)》《中国交通地图册(2011)》《实用中国地图册(2017)》(图2),参照《中华人民共和国公路工程技术标准(JTGB01—2014)》^[26]确定各等级道路行车速度,铁路行车速度依据火车提速前后的速度设定,不同年份等级道路行车速度如表1所示。

1.2 研究方法

1.2.1 位序—规模法则

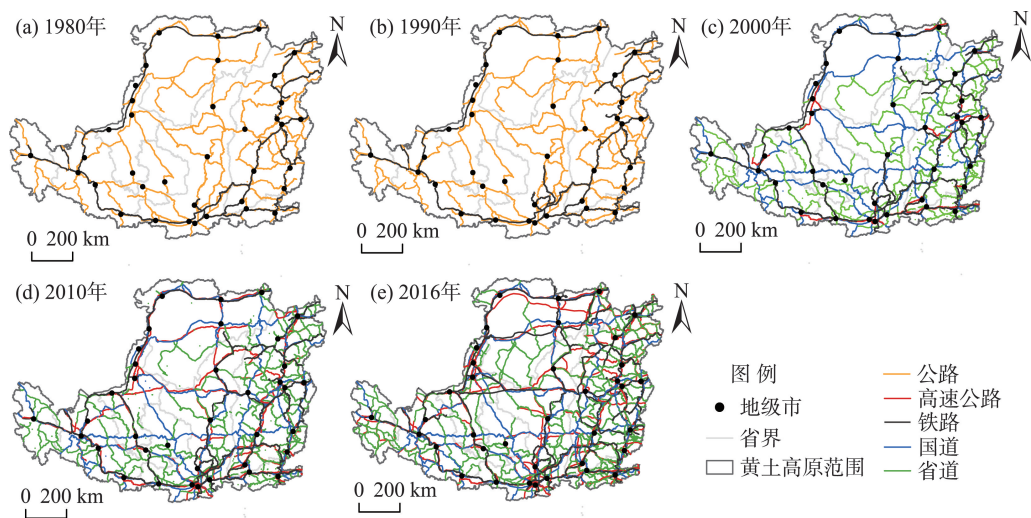
位序—规模法则从城市的规模和城市规模位序的关系来衡量一个地区城市体系的规模分布。本文假定黄土高原地区乡镇尺度的人口规模及其位序服从如下的幂函数规律:

$$P_i = P_1 \times R_i^{-q} \tag{1}$$

$$\ln P_i = \ln P_1 - q \ln R_i \tag{2}$$

表1 黄土高原地区不同等级道路速度
Tab.1 Traffic speed on roads of different grades on the Loess Plateau (km/h)

年份	高速公路	国道	省道	县乡道	铁路
1980	—	35	35	20	30
1990	—	45	45	30	40
2000	90	60	50	35	60
2010	100	80	60	40	90
2016	100	80	60	40	90



注:参考《中国交通地图册》,1980年和1990年主要道路均为公路,故图例中的公路仅指1980年和1990年情况,高速公路在2000年出现。

图2 1980—2016年黄土高原地区交通网络
Fig.2 Road network of the Loess Plateau, 1980-2016

式中: P_i 和 R_i 分别代表某乡镇的人口(可达性)规模和位序; P_1 代表位序为首位的乡镇的人口(可达性)规模; q 表示齐夫指数,为常值。当 $q=1$ 时,人口(可达性)规模体系处于自然状态下的最优分布;当 $q>1$ 时为集中分布模式;当 $q<1$ 时,为均衡分布模式。无标度区识别中,根据每一点的对数值确定具体转折点,所求曲线为相关系数最高的拟合曲线^[27]。

1.2.2 异速标度律

异速标度概念是在标度分析和异速生长定律基础发展而来。国内陈彦光^[28]进行了大量研究,异速生长规律就是区域内存在联系的两个要素存在着按常数比率变化的性质。其数学模型可以反映明确的结构关系,异速标度律可以表示如下:

$$A_t = aP_t^b \tag{3}$$

式中: A_t 表示 t 时刻乡镇可达性规模, a 为比例系数, P_t 表示 t 时刻乡镇人口规模, b 为异速生长系数。

因人口规模有负增长,从而异速生长系数存在负值,根据 $|b|$ 的大小:① 当 $|b|=1$ 时,人口和可达性增长(下降)保持同速,呈线性关系;② 当 $|b|>1$ 时,为正异速生长,是超线性关系,可达性规模相对增长速度高于人口规模相对增长(下降)速度;③ 当 $|b|<1$ 时,为负异速生长,是亚线性关系,人口规模相对增长(下降)速度快于可达性规模相对增长速度(表2)。人口增长正异速一、二、三级及负异速一级,说明可达性提升对乡镇人口规模起到“正向”促进作用;人口下降正异速一、二、三级及负异速一级,

表2 人口—可达性关系异速分级
Tab.2 Allometric levels of population and accessibility

异速类型	划分标准	异速级别	特征
正异速	$b<-3$	人口下降正异速三级	可达性相对增长速度远高于人口相对下降速度
	$-3<b<-2$	人口下降正异速二级	可达性相对增长速度高于人口相对下降速度
	$-2<b<-1$	人口下降正异速一级	可达性相对增长速度较高于人口相对下降速度
负异速	$-1<b<0$	人口下降负异速一级	人口相对下降速度较高于可达性相对增长速度
	$0<b<1$	人口增长负异速一级	人口相对增长速度较高于可达性相对增长速度
正异速	$1<b<2$	人口增长正异速一级	可达性相对增长速度较高于人口相对增长速度
	$2<b<3$	人口增长正异速二级	可达性相对增长速度高于人口相对增长速度
	$3<b$	人口增长正异速三级	可达性相对增长速度远高于人口相对增长速度

说明可达性提升对乡镇人口规模起到“反向”抑制作用。

1.2.3 可达性模型

可达性测算指标区位优势潜力模型反映各乡镇在空间上所受中心城市空间“合力”,侧重于节点乡镇与经济重心城市的相互作用^[29]。本文以乡镇单元为研究尺度,以3006个乡镇为出发地,37个地级市为目的地,考虑区域内部的自身潜能,因此潜能可达性计算模型为:

$$EP_i = \frac{M_i}{T_{ii}^\beta} + \sum_{j=1}^{n-1} \frac{M_j}{T_{ij}^\beta} \quad (4)$$

式中: EP_i 为乡镇 i 的潜能可达性值,值越大,表示其潜能可达性水平越好; T_{ij} 为节点乡镇 i 到地级市 j 的最短出行时间; M_j 为各地市节点 j 的质量,用人均GDP表示; β 为距离衰减参数,根据已有研究,若研究区域较大, β 通常取值为1^[30]; M_i 为乡镇节点 i 的质量,用人口规模表示; T_{ii} 为乡镇 i 内部平均时间,其内部距离以与其等面积的圆的半径表示^[31],则 T_{ii} 计算公式为:

$$T_{ii} = \frac{\sqrt{S/\pi}}{2v} \quad (5)$$

式中: S 为各乡镇镇域面积; v 为行车速度,取值为各年份县乡道速度值。

2 人口和可达性规模结构及变动特征

2.1 人口规模以中小等级乡镇为主,总体呈“南北高、中间低”分布

1980—2016年,乡镇平均人口规模由18427人增至20464人,年均增长率为0.29%,最大人口规模由123815人增至169216人,最小人口规模由1000人减少至422人;其次,河谷平原区平均人口规模最大,黄土丘陵沟壑区最小,农灌区人口增长最快,沙地和沙漠区人口呈负增长。从乡镇人口金字塔可知(图3),黄土高原地区乡镇人口规模数量结构呈现分散型分布特征,以中小等级乡镇偏多,人口规模小于3万人的乡镇在2016年占比达79%;动态变化看,乡镇人口金字塔中部越来越收缩,金字塔顶部的高等级乡镇及底部的低等级乡镇数量在增加,中小等级乡镇的人口向高等级乡镇晋级明显。

时空分析发现(图4):① 乡镇人口规模“南北高、中间低”的格局基本未发生变化,人口主要集中在河谷平原区的关中平原、汾河谷地平原,农灌区

的河套平原,土石山区的伊洛河下游平原,形成太原城市群、关中平原城市群、宁夏沿黄城市群、呼包鄂城市群,以及分布在黄土高原沟壑区的陇中南部、陇东、宁南等地;人口规模较少乡镇主要在吕梁山、太行山地,鄂尔多斯高原以及陕甘宁交界地区。② 各分区内部乡镇人口规模分布表现出以各地市(县市)为中心呈同心圆向外递减的趋势,较为明显如以西安、太原、洛阳等为核心向外递减。③ 36 a间近60%乡镇人口规模增加,年均增长率分布与人口格局基本一致,黄土高原沟壑区的陇中宁南历史上一直呈经济发展差、人口增速快的特征;晋陕蒙接壤处煤炭资源最丰富,黄河贯穿其中,人口较为集中;其次在农灌区的银川平原和河谷平原区。人口减少乡镇主要在自然区位差、经济发展滞后的山区和传统农牧生产区,如吕梁山区、太行山区、鄂尔多斯高原等。

2.2 乡镇潜能可达性逐渐增强,整体上自东南向西北逐渐降低

基于潜能可达性计算公式,黄土高原地区乡镇潜能可达性空间分布及年均增长率如图5、图6所示。结果表明:① 1980—2016年,乡镇潜能可达性均值总体呈上升趋势,由1980年的257930增至2016年的623288,年均增长率2.48%,表明整体上乡镇之间相互作用潜力得到进一步提升;其次,河谷平原区可达性最优且增长最慢(2.02%),沙地和沙漠区可达性最差但增长最快(4.91%)。② 乡镇潜能可达性整体上自东南向西北逐渐降低,东部乡镇相互作用潜力优于西部乡镇;其次,各乡镇潜能可达性沿京昆线、陇海线轴带分布,廊道效应明显,且以中心城市如包头为核心向外递减。③ 阶段特征明显,可达性最优区发生较大变化,1980年乡镇可达

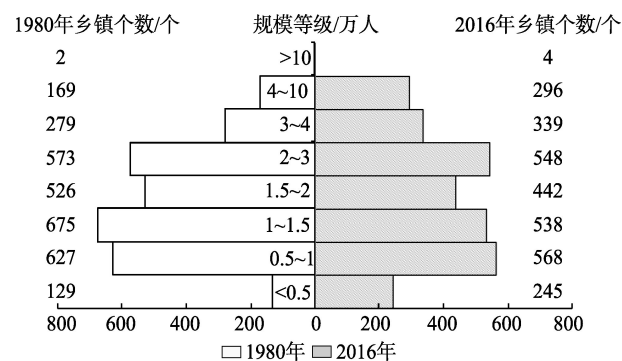
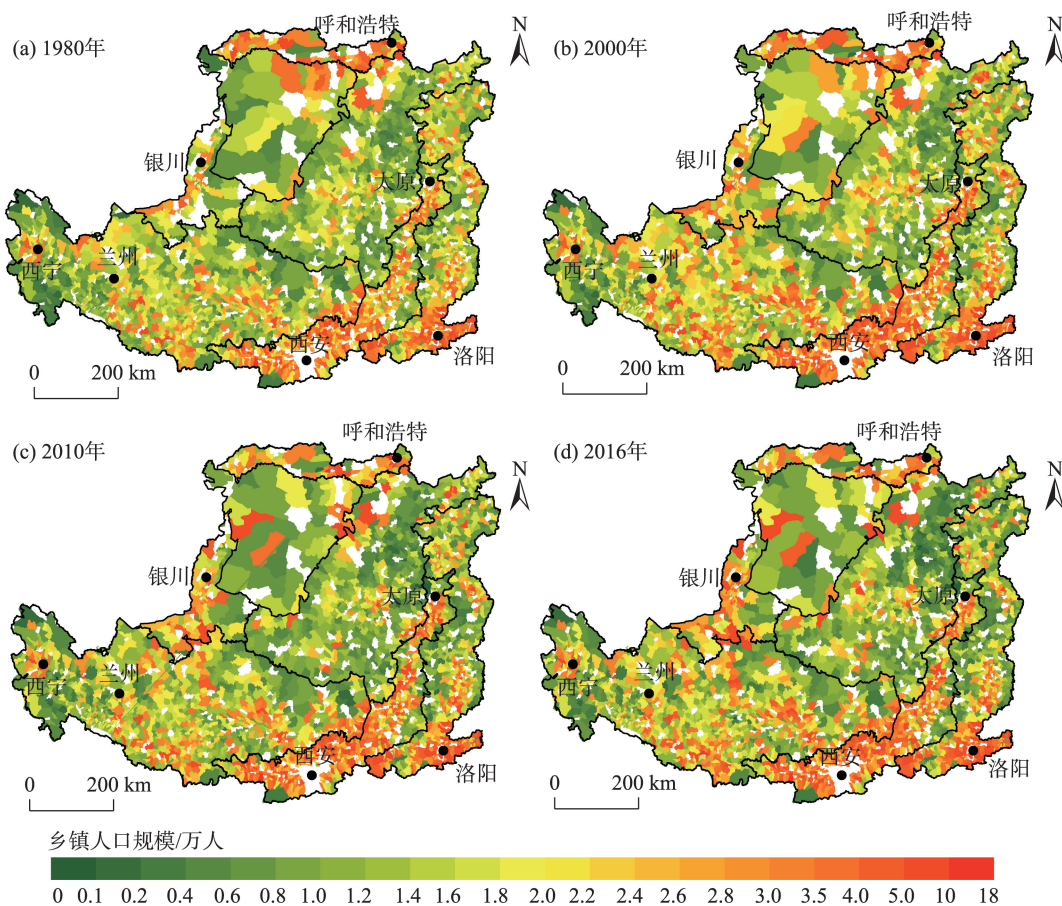


图3 1980年和2016年乡镇人口规模金字塔

Fig.3 Population pyramid of the towns and townships in 1980 and 2016



注:图中白色斑块为街道及县城所在建制镇。

图4 1980—2016年黄土高原地区人口规模空间分布

Fig.4 Spatial patterns of population on the Loess Plateau, 1980–2016

性大致形成以“西安—咸阳、太原—晋中、临汾、长治、洛阳”为核心向外递减的5个高值区,2000年新形成以“包头、大同”为核心的可达性高值区,2010年,“吴忠、中卫、西宁”高值区显现,到2016年,这一格局基本保持不变且进一步增强。④ 36 a的交通建设使得各乡镇潜能可达性得到增长,各乡镇相互作用潜力明显增强,与人口增长特征不同,可达性最优区增长较慢;沙地和沙漠区乡镇可达性增长最快,其次为内蒙古、宁夏、陕西、甘肃4个省区交界处边缘乡镇,但仍为可达性水平最差地区。

3 人口和可达性位序—规模特征

3.1 人口位序—规模具有明显双分形结构,由均衡向集中转变态势明显

从全局拟合来看(表3),1980—2016年,各年份齐夫指数均小于1,人口位序—规模分布为位次型分布,中小等级乡镇发育较好,高位序乡镇不很突

出;从动态变化看,齐夫指数由0.559增大至0.671,集中分布态势明显。

从局部拟合来看(表3):① 各年份人口规模均存在2个无标度区,大规模乡镇和中小规模乡镇各自构成的2个无标度区分化明显,等级结构衔接紧密,具有明显的双分形结构。② 无标度区一主要由人口大于2万的乡镇构成,乡镇数量逐渐增多,2016年最多,为1203个,齐夫指数小于0.5,规模差异较小,各乡镇均衡分布特征明显;从动态变化看,齐夫指数由1980年的0.27增大至2016年的0.33,人口规模趋向于集中发展,人口规模在4万以上的乡镇较1980年增加129个,形成汾渭平原、银川平原等人口集聚区。③ 无标度区二主要由人口大于0.5万的乡镇构成,乡镇数量总体减少,齐夫指数均大于1,为明显的集中分布,说明各乡镇人口规模有较大差异。④ 从动态变化看,1980年和1990年齐夫指数接近于1,显示中小规模乡镇的人口规模分布较为合理,接近最优的位序—规模分布;2000—2016

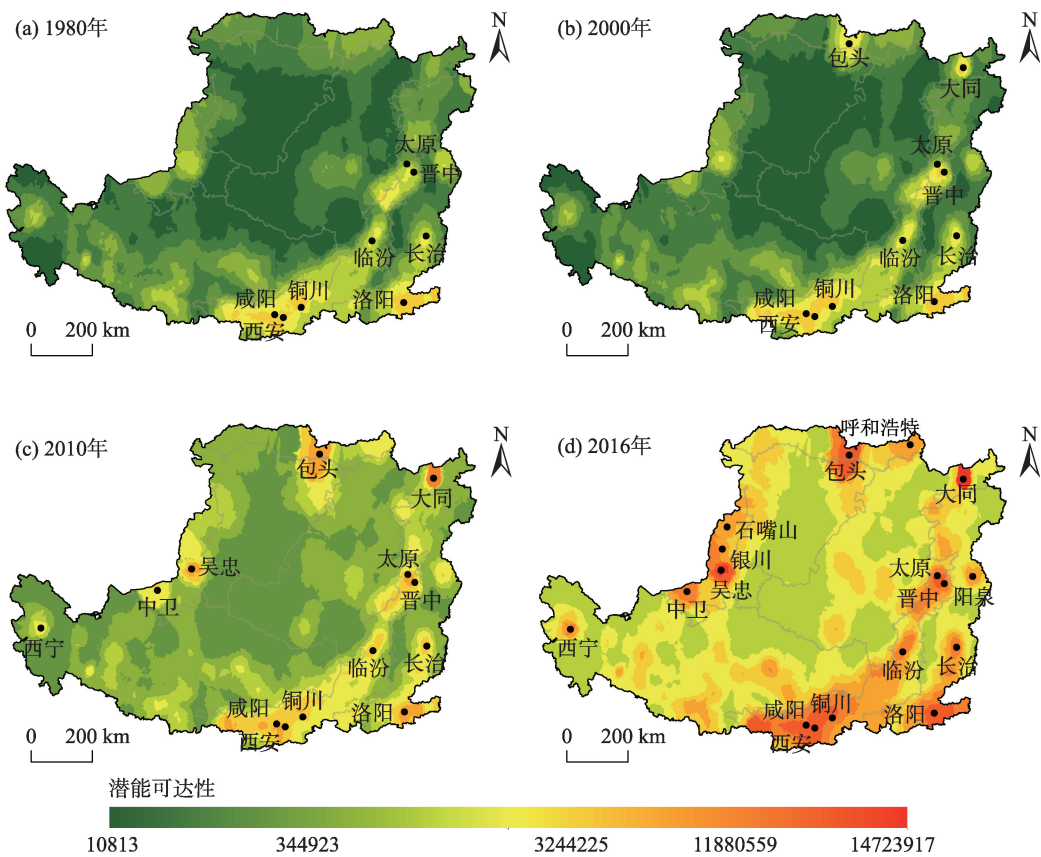
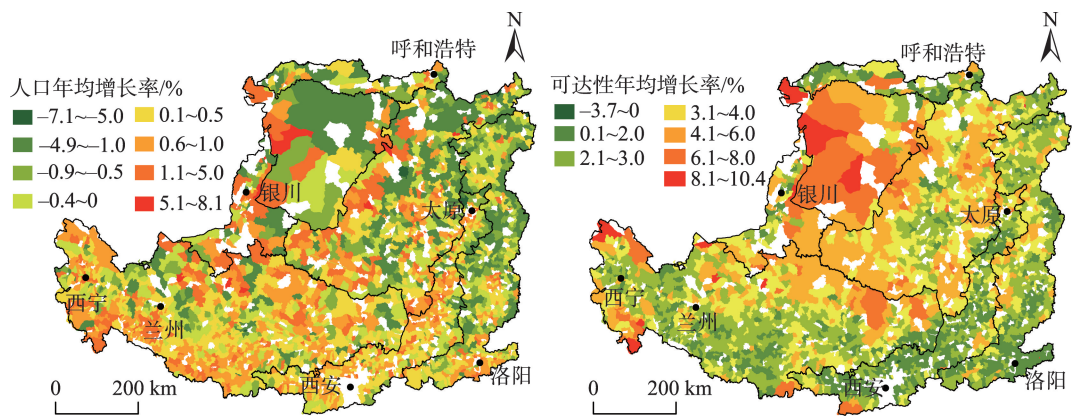


图5 1980—2016年黄土高原地区潜能可达性空间分布
Fig.5 Spatial patterns of potential accessibility on the Loess Plateau, 1980-2016



注：图中白色斑块为街道及县城所在建制镇。
图6 1980—2016年黄土高原地区人口规模和潜能可达性年均增长率
Fig.6 Annual average growth rate of population and potential accessibility on the Loess Plateau, 1980-2016

年增大至1.55,属于逐步升高的高位序分布,中等规模乡镇人口不断增多,集中化态势明显,人口规模结构比较稳定。总体上,大规模乡镇与中小规模乡镇各自构成的2个无标度区分化明显,中高等规模乡镇人口进一步集中,小规模乡镇不断衰落,最

终趋于自然状态下的最优分布(图7)。
3.2 可达性位序—规模分布由双分形演变为单分形结构,由低水平均衡转向更高水平均衡
从全局拟合来看(表3),1980—2016年,各年份齐夫指数均小于1,可达性位序—规模分布为位次

型,分布较为分散;从动态变化看,齐夫指数由0.672降低至0.424,可达性规模分散化态势明显;其次,判定系数 R^2 更高,说明相对于可达性,乡镇人口规模分布更不均衡。

从局部拟合来看,可将其划分为2个阶段(图7):

(1) 1980—2000年呈双分形结构:①1980、1990、2000年可达性位序—规模均存在2个无标度区,呈双分形结构,与无标度区一相比,无标度区二的可达性规模水平较低,高可达性乡镇与低可达性乡镇的分割发展明显。究其原因,早期路网建设主要以主干道、城市中心、平原地区为主,对偏远落后区关注缺乏。②无标度区一齐夫指数小于0.5,分布分散,规模差异较小;齐夫指数波动增大,可达性规模趋于集中发展,形成以西安、洛阳、太原等为中心的可达性最优区。③无标度区二齐夫指数均大于1且呈波动增长,为明显的集中分布,各乡镇可达性规模虽有较大差异,但可达性水平不断增强。

(2) 2010—2016年呈单分形结构:①随着交通网络的不断优化,大中小规模乡镇可达性规模等级和结构得以完善,形成了单一的无标度区,位序—

规模分布为单分形结构,规模分布发育趋于成熟;其次,中等级规模乡镇的发育为单分形结构的形成起到了关键作用,促成了大中小型乡镇的位序梯次分布。②从分形拟合的特征来看,齐夫指数由0.431减小至0.395,集中化程度呈缩小态势,但中小可达性规模乡镇与大规模乡镇相比,仍差距较远。

3.3 6大分区人口和可达性位序—规模特征

1980—2016年,各分区齐夫指数变化与黄土高原地区整体保持一致(图8),人口和可达性齐夫指数均小于1,人口齐夫指数增大,可达性齐夫指数减小,表明各分区内部中小等级乡镇发育较好,高位序乡镇不突出;从动态变化看,人口趋于集聚、可达性进一步均衡发展;相较而言,到2016年人口齐夫指数均大于可达性齐夫指数,人口较可达性集聚分布。

2016年6大分区人口齐夫指数从大到小依次为土石山区(0.717)、黄土丘陵沟壑区(0.690)、沙地和沙漠区(0.687)、农灌区(0.656)、黄土高塬沟壑区(0.583)、河谷平原区(0.536)。土石山区地貌类型多样,豫西、晋东南人口规模大,太行山区人口规模

表3 1980—2016年黄土高原地区乡镇人口和可达性位序—规模分布拟合结果

Tab.3 Rank-size distribution fitting results of population and accessibility at the town and township scale, 1980–2016

年份	标度区 分段	人口			可达性		
		无标度区 范围	位序—规模		无标度区 范围	位序—规模	
			q 值	R^2 值		q 值	R^2 值
1980	全局	1~2980	0.559	0.77	1~2980	0.672	0.76
	无标度区一	1~897	0.266	0.95	1~757	0.277	0.95
	无标度区二	898~2697	1.011	0.96	758~2724	1.162	0.95
	无效标度区	2698~2980			2725~2980		
1990	全局	1~1639	0.560	0.76	1~1639	0.658	0.77
	无标度区一	1~557	0.278	0.95	1~492	0.308	0.96
	无标度区二	558~1480	1.076	0.95	493~1525	1.226	0.95
	无效标度区	1481~1639			1526~1639		
2000	全局	1~3000	0.587	0.76	1~3000	0.642	0.81
	无标度区一	1~1064	0.287	0.95	1~897	0.305	0.95
	无标度区二	1097~2697	1.176	0.97	898~2835	1.207	0.96
	无效标度区	2698~3000			2836~3000		
2010	全局	1~3006	0.641	0.76	1~3006	0.463	0.90
	无标度区一	1~1164	0.330	0.95	2~2751	0.431	0.93
	无标度区二	1165~2815	1.434	0.95			
	无效标度区	2816~3006					
2016	全局	1~3006	0.671	0.73	1~3006	0.424	0.91
	无标度区一	1~1203	0.334	0.95	3~2751	0.395	0.95
	无标度区二	1204~2760	1.553	0.95			
	无效标度区	2761~3006			2752~3006		

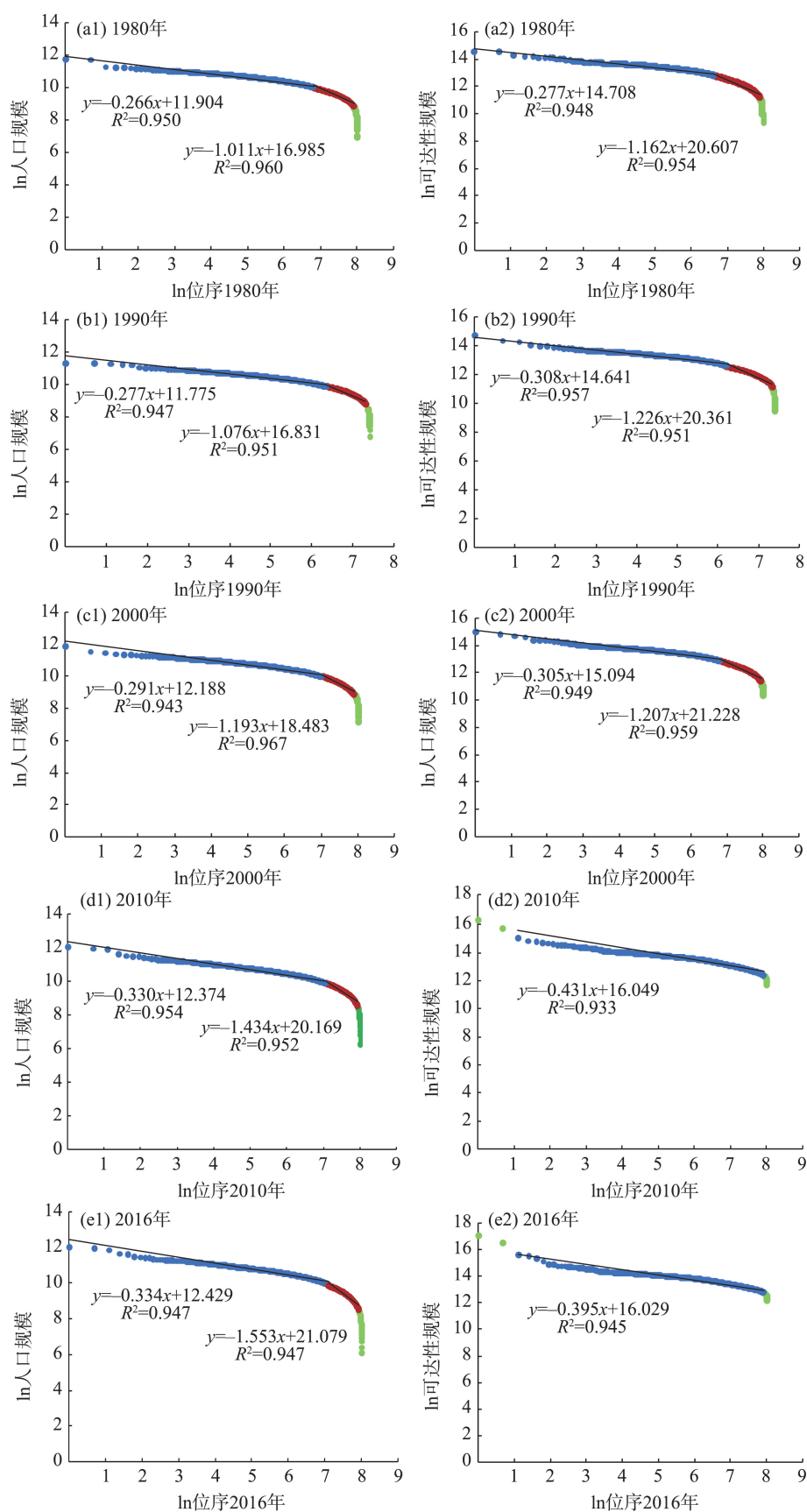


图7 1980—2016年黄土高原地区乡镇尺度人口和可达性位序—规模分布双对数图

Fig.7 Ln-Ln graph of rank-size distribution of population and accessibility at the town and township scale, 1980–2016

小,人口规模差异大,齐夫指数最大,人口分布更为集中;河谷平原区以平原、盆地为主,各乡镇人口规模均较大,呈扁平化发展,所以该区齐夫指数最小,人口均衡程度高。上述6大分区较1980年分别增加0.16、0.20、0.05、0.13、0.05、0.07,黄土丘陵沟壑区齐夫指数提升幅度最大,该区随着陕北国家级能源化工基地的启动建设,2000年后以榆林为中心的经济扩散效应显现,周围乡镇人口规模增大,其次陕北西隅人口也快速增长,所以该区齐夫指数提升最大,人口也较为集聚;沙地和沙漠区由于自然条件限制,乡镇人口规模变动较小,提升幅度则最小。

2016年6大分区可达性齐夫指数从大到小依次为农灌区(0.538)、土石山区(0.415)、沙地和沙漠区(0.368)、河谷平原区(0.337)、黄土高塬沟壑区(0.332)、黄土丘陵沟壑区(0.317)(图8)。各区可达性均衡程度已较高。农灌区可达性更集聚分布,宁夏沿黄和内蒙古沿黄地区可达性差异较大;黄土丘陵沟壑区可达性均衡发展明显,该区无省会城市,无可达性最优区,可达性差异较小,处于低水平均衡。上述6大分区较1980年分别减小0.12、0.22、0.43、0.16、0.24、0.24,各区可达性均衡发展趋势明显。沙地和沙漠区可达性水平低、增长最快,所以齐夫指数减小幅度最大;农灌区可达性水平高、增长慢,减小幅度最小。

4 人口和可达性异速标度关系

1980—2016年,黄土高原地区乡镇人口和可达性异速关系差异明显(表4)。第一,除个别年份外,黄土高原地区及6大分区的异速标度指数 b 均小于1,处于负异速生长阶段,人口相对增长速度快于可达性相对增长速度;第二,异速标度指数持续下降,究其原因,人口齐夫指数增大、可达性齐夫指数减小,人口趋于集聚分布、可达性进一步均衡;其次,异速标度指数尤以2000—2010年间变化显著,原因在于这段时间国家相继提出“西部大开发”等战略使得该区公路里程迅速增加。第三,分区来看,2016年异速标度指数从大到小依次为农灌区、土石山区、河谷平原区、黄土高塬沟壑区、黄土丘陵沟壑区、沙地和沙漠区,较1980年分别减少0.404、0.554、0.541、0.504、0.613、0.823,沙地和沙漠区人口变动较小,可达性增长较快且趋于均衡,所以异速标度指数变动显著且值最小;农灌区人口变动小,可达性增长较慢且较为集中,所以异速标度指数值最大。

分乡镇来看,36 a间,黄土高原地区3006个乡镇人口和可达性异速关系协调性总体较弱,整体以正异速生长为主,负异速生长为辅,乡镇数量比为4.32:1,即大部分乡镇的可达性相对增长速度快于

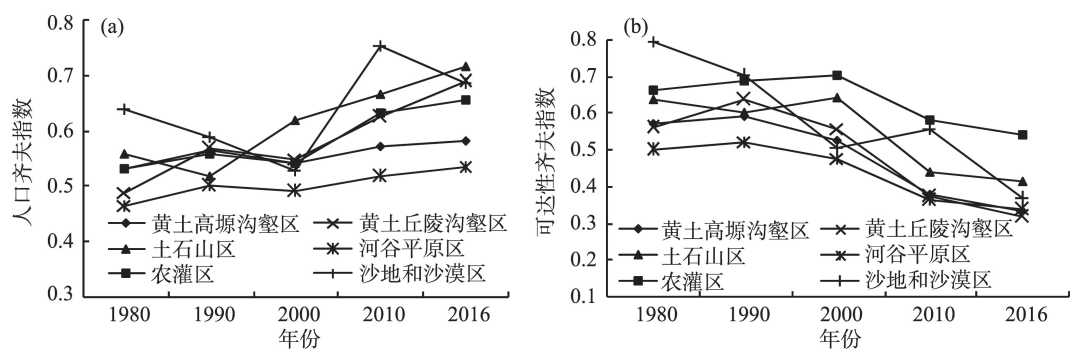


图8 1980—2016年黄土高原地区乡镇尺度人口和可达性齐夫指数变化
Fig.8 Dynamics of Zipf's index of population and accessibility at the town and township scale, 1980–2016

表4 1980—2016年黄土高原地区乡镇人口—可达性异速生长模型

Tab.4 Results of goodness-of-fit test of allometric growth of population-accessibility, 1980–2016

年份	黄土高原地区	河谷平原区	黄土丘陵沟壑区	黄土高塬沟壑区	农灌区	土石山区	沙地和沙漠区
1980	1.035	1.003	0.908	0.935	0.897	1.018	1.113
1990	0.983	0.984	0.948	0.902	0.895	1.011	0.996
2000	0.917	0.879	0.797	0.811	0.872	0.923	0.678
2010	0.543	0.519	0.400	0.518	0.613	0.534	0.483
2016	0.449	0.462	0.295	0.431	0.493	0.464	0.290

人口相对增长速度;空间上,负异速生长乡镇零散分布(图9)。分区来看:

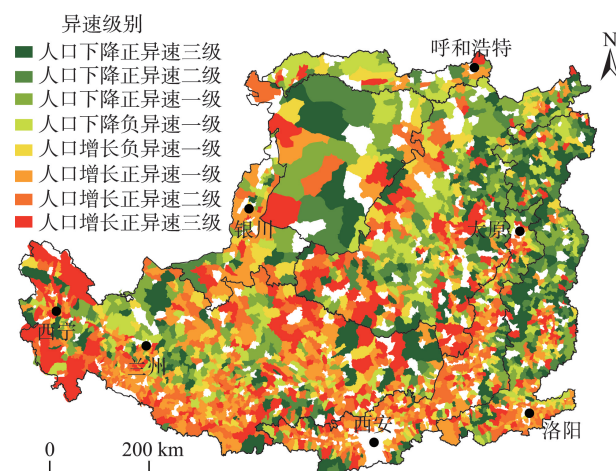
(1) 黄土高塬沟壑区主要包括渭北旱塬、陇东和陇中黄土高原等地,该区塬面广阔平坦、沟壑深切。异速生长系数空间分布大致呈周边高、中间低,异速生长类型以人口增长正异速一级、二级、三级为主,乡镇数量占比分别为23.71%、19.79%、17.59%。一级和二级主要分布在陇中南部,自然区位条件差,少数民族聚集,历史原因下人口基数大、增长较快,可达性水平中等、增长较慢;三级主要分布在青东南北、陇东及渭北旱塬西部,农业生产条件较为优越,人口基数小、增长快,可达性水平低、增长较快,可达性对人口正向促进作用明显。异速生长类型以人口下降正异速一级、三级、负异速一级为辅,乡镇数量占比分别为12.74%、11.18%、10.48%,主要分布在中心城市如西宁、海东、白银、兰州周围,可达性不断优化,中心极化效应仍明显,乡镇人口不断减少;其次在宁南西海固地区,因自然条件恶劣,从20世纪80年代以来就开展了一系列移民工程机械减少人口数量。该区西宁、兰州、白银等中心城市应积极发挥带动作用,加快发展县域经济,促进人口规模体系合理化;青东、陇中应严控人口自然增长率,采取移民方式机械减少人口数量,提高人口素质;陇东、渭北旱塬粮食基地应增强交通网络建设,增强区内、区际商品流通能力。

(2) 黄土丘陵沟壑区主要包括陕北黄土高原、吕梁山地等,该区以茆状、梁状丘陵为主,沟壑纵横、地形破碎。异速生长类型以人口下降正异速一级、三级为主,乡镇数量占比分别为20.16%、13.77%,主要分布在陕北东部、晋北西北部,以榆林为中心县域经济增长扩散效应明显,导致陕北东部沿黄地区人口减少,可达性水平中等、增长较慢,可达性水平提升促进边缘乡镇人口减少。异速生长类型以人口增长正异速三级、二级为辅,乡镇数量占比分别为13.93%、11.15%,主要分布在陕北西部、晋西和晋陕蒙交界处,陕北西部人口规模小、增长较快,可达性水平低、增长较快;晋西及晋陕蒙交界处人口规模大、增长快,可达性水平中等、增长较快,可达性水平提升促进人口增长。该区乡镇人口交通的中心城市指向明显,应继续发挥其扩散效应,促进人口低等级向中高等级集聚;其次,可达性仍处于低水平均衡阶段,增强东西向道路网络化建设。

(3) 河谷平原区主要为渭河和汾河谷地,自然条件优越,不仅是重要的农业区而且大部分经济活动集中于此。异速生长类型以人口增长正异速二级、一级、三级为主,乡镇数量占比分别为27.96%、25.09%、14.16%,北部形成以太原、晋中为核心的太原城市群,南部形成以西安、宝鸡、铜川、渭南等为核心的关中平原城市群,辐射带动作用强,扩散效应明显,乡镇人口规模大、增长较快,可达性水平优越、增长慢,可达性水平提升对人口增长的正向效应明显。该区人口和可达性均处于高水平均衡阶段,应注重发展特色小城镇,激发乡村的内生发展动力,促进三产融合发展。

(4) 土石山区地处太行山区,区内山丘广布,平川较少,是黄土高原地区重要的水源涵养区。异速生长类型以人口下降正异速三级、一级、二级及负异速一级为主,乡镇数量占比分别为20.54%、14.81%、12.29%、11.45%,主要分布在中北部山区,整体自然资源贫瘠,交通基础薄弱,人口规模中等、负增长,可达性中等水平、增长较慢,可达性对人口增长起抑制作用。异速生长类型以人口增长正异速一级、二级为辅,乡镇数量占比分别为14.48%、9.76%,主要分布在中心市长治、晋城、洛阳一线,区位条件优越,人口规模大、增长较快,可达性水平较高、增长慢,可达性促进人口增长。该区豫西及晋东南与河谷平原区类似,中北部应重点发展中心村镇,改善内外交通条件。

(5) 农灌区主要由宁夏引(扬)黄灌区和内蒙古



注:图中白色斑块为街道及县城所在建制镇。

图9 黄土高原地区各乡镇异速类型及级别

Fig.9 Allometric growth types and levels at the town and township scale on the Loess Plateau

河套平原灌区构成,区内水源比较充足,分布着大片绿洲和大型农灌区。异速生长类型主要为人口增长正异速一级和人口下降负异速一级,乡镇数量占比分别为27.50%、21.88%,人口增长正异速一级主要分布在宁夏沿黄地区,乡镇人口规模大、增长快,可达性水平较高、增长较快,可达性促进人口增长明显;人口下降负异速一级主要分布在河套地区,人口规模中等、负增长,可达性水平中等、增长慢,可达性促进人口减少。该区应发挥宁夏沿黄城市群和呼包鄂城市群辐射带动作用,继续提高农业生产技术和机械化程度,促进劳动力向非农产业转移。

(6) 沙地和沙漠区分布于鄂尔多斯高原腹地,以毛乌素沙地地貌类型为主,气候干旱、降水稀少。异速生长类型主要为人口下降正异速二级、三级、一级,乡镇数量占比分别为18.42%、15.79%、15.79%,鄂尔多斯市是典型的能源资源型城市,2000年以后,随着矿产资源的大规模开发,促进了人口向城镇地区集聚,人口规模小、负增长,可达性水平低、高速增长,可达性提升促进人口减少。该区应加快产业结构转型,提升农民自身素质,吸引人口向城镇集聚;同时继续加快路网建设。

5 讨论与结论

5.1 讨论

学界已证实了交通可达性对人口分布的不同影响,可以看出,基于位序—规模法则和异速生长模型的黄土高原地区人口和可达性关系分析可以提供其他方法难以体现在空间上、组织规律上呈现的等级规模分布模式。分析表明:第一,黄土高原地区乡镇人口规模体系由分散向集中转变,规模体系逐渐合理化;以机会公平为基础的交通网络建设均衡性明显,可达性由低水平均衡向高水平均衡转变;整体上可达性较人口规模变动快,这也是异速分析中大部分乡镇可达性相对增长速度快于人口相对增长/下降速度的原因。第二,地理区位、资源禀赋、发展条件不同,各乡镇人口与可达性作用差异明显,在人口减少地区交通带来的时空压缩促进中心地区的极化效应大于溢出效应,而经济发达区域的扩散效应促进乡镇人口增加,经济条件较差地区乡镇人口增加则易于陷入人口—经济—生态的恶性循环。第三,5个时间节点所表现出的异速生长阶段特征明显,说明人口—可达性异速标度指数

仅在一定时期内为常数,长时期的波动特征与各乡镇仍处于较大的变动发展期有很大关系。

现有人口和可达性关系研究侧重于从经济计量模型出发,研究可达性对人口增长的贡献,如李涛等^[4]利用广义可加模型得出珠三角地区公路交通对人口变化在1990—2000年间的解释贡献率达到53.13%;崔彩辉等^[14]基于相关系数验证了河南省乡镇可达性与人口密度在0.5 h等时圈最大。黄土高原地区内部发展水平差异较大,利用位序—规模法则和异速生长模型,揭示人口和可达性规模结构、等级体系及异速标度演化特征,对于深入了解区域内部人口和可达性关系有一定的参考价值。本文研究的不足之处,由于乡镇尺度数据限制,仅选取了5个时间节点分析,今后可从县域尺度以连续年份进行研究,可找到异速标度指数突变的年份。

5.2 结论

本文基于位序—规模分布和异速生长理论,从乡镇尺度量化了黄土高原地区1980、1990、2000、2010和2016年的人口和可达性规模结构及空间分布特征,并分析与验证了人口和可达性的位序—规模分布规律及其异速标度关系。研究结果表明:

(1) 人口规模以中小等级乡镇为主,60%的乡镇人口规模呈增长趋势,总体呈“南北高、中间低”分布;人口规模河谷平原区>农灌区>土石山区>黄土高原沟壑区>沙地和沙漠区>黄土丘陵沟壑区。可达性水平总体增强,整体上自东南向西北逐渐降低;可达性河谷平原区>农灌区>土石山区>黄土丘陵沟壑区>黄土高原沟壑区>沙地和沙漠区。

(2) 人口和可达性均为位次型分布,人口位序—规模具有明显双分形结构,由均衡向集中转变态势明显;土石山区人口分布更为集中,河谷平原区人口均衡程度高。可达性位序—规模分布以2000年为转折点由双分形结构演变为单分形结构,由低水平均衡转向更高水平均衡,农灌区可达性更集聚分布,黄土丘陵沟壑区可达性均衡发展明显。

(3) 分区来看,人口和可达性异速关系整体处于负异速生长阶段,农灌区异速标度指数最大,沙地和沙漠区最小;分乡镇来看,3006个乡镇整体以正异速生长为主,负异速生长为辅,乡镇数量比为4.32:1。黄土高原沟壑区、河谷平原区内乡镇异速生长类型主要为人口增长正异速生长,黄土丘陵沟壑区、土石山区、沙地和沙漠区内乡镇主要为人口下降正异速生长,农灌区内乡镇异速生长类型主要

为人口增长正异速一级和人口下降负异速一级。

(4) 黄土高原沟壑区中心城市应尽快走完极化效应阶段,严控人口自然增长率,机械减少人口数量,提高人口素质;黄土丘陵沟壑区应吸引劳动力由第一产业向第二、三产业转移,促进人口低等级向中高等级集聚,并增强东西向道路网络化建设;河谷平原区应注重发展特色小城镇,促进三产融合发展;土石山区中北部应重点发展中心村镇,改善内外交通条件;农灌区应继续提高农业生产技术和机械化程度,促进劳动力向非农产业转移;沙地和沙漠区应加快产业结构转型,提升农民自身素质,吸引人口向城镇集聚,同时继续加快路网建设。

参考文献(References)

- [1] Kim J Y, Han J H. Straw effects of new highway construction on local population and employment growth [J]. *Habitat International*, 2016, 53: 123-132.
- [2] Atack J, Haines M R, Margo R A. Did railroads induce or follow economic growth? Urbanization and population growth in the American Midwest, 1850-60 [J]. *Social Science History*, 2009, 34(2): 171-197.
- [3] Kotavaara O, Antikainen H, Rusanen J. Population change and accessibility by road and rail networks: GIS and statistical approach to Finland 1970-2007 [J]. *Journal of Transport Geography*, 2011, 19(4): 926-935.
- [4] 李涛, 曹小曙, 黄晓燕. 珠江三角洲交通通达性空间格局与人口变化关系 [J]. *地理研究*, 2012, 31(9): 1661-1672. [Li Tao, Cao Xiaoshu, Huang Xiaoyan. The relationship between spatial structure of accessibility and population change in Pearl River Delta. *Geographical Research*, 2012, 31(9): 1661-1672.]
- [5] Chi G Q. The impacts of transport accessibility on population change across rural, suburban and urban areas: A case study of Wisconsin at sub-county levels [J]. *Urban Studies*, 2012, 49(12): 2711-2731.
- [6] Schwartz R, Gregory I, Thevenin T. Spatial history: Railways, uneven development, and population change in France and Great Britain, 1850-1914 [J]. *Journal of Interdisciplinary History*, 2009, 42(1): 53-88.
- [7] Voss P R, Chi G Q. Highways and population change [J]. *Rural Sociology*, 2006, 71(1): 33-58.
- [8] Jiwattanakulpaisarn P, Noland R B, Graham D J, et al. Highway infrastructure investment and county employment growth: A dynamic panel regression analysis [J]. *Journal of Regional Science*, 2009, 49(2): 263-286.
- [9] Asher V, Boris A P, Yehuda G. Train access and financial performance of local authorities: Greater Tel Aviv as a case study [J]. *Journal of Transport Geography*, 2011, 19(2): 224-234.
- [10] 王振波, 徐建刚, 朱传耿, 等. 中国县域可达性区域划分及其与人口分布的关系 [J]. *地理学报*, 2010, 65(4): 416-426. [Wang Zhenbo, Xu Jiangang, Zhu Chuangeng, et al. The county accessibility divisions in China and its correlation with population distribution. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(4): 416-426.]
- [11] 赵璟, 党兴华, 王修来. 城市群空间结构的演变: 来自中国西部地区的经验证据 [J]. *经济评论*, 2009(4): 27-34. [Zhao Jing, Dang Xinghua, Wang Xiulai. Evolution of urban agglomeration's spatial structure: Evidence from western area in China. *Economic Review*, 2009(4): 27-34.]
- [12] Soo K T. Zipf's Law for cities: Across-country investigation [J]. *Regional Science and Urban Economics*, 2005, 35(3): 239-263.
- [13] Chi G Q, Kasu B, Hall S. Economic and demographic impacts of passenger rail systems: The impact of intercity passenger rails on population and employment change in the United States, 2000-2010 [R/OL]. NCITEC Project No. 13-008. <http://www.ncitec.msstate.edu/wp-content/uploads/2013-08FR.pdf>. 2015.
- [14] 崔彩辉, 韩志刚, 苗长虹, 等. 河南省人口分布与乡镇可达性空间耦合特征 [J]. *人文地理*, 2017, 31(5): 98-118. [Cui Caihui, Han Zhigang, Miao Changhong, et al. Spatial coupling features of population and township accessibility distribution in Henan Province. *Human Geography*, 2017, 31(5): 98-118.]
- [15] 郭建科, 何瑶, 王绍博, 等. 1985年以来中国大陆沿海集装箱港口体系位序—规模分布及其网络联系 [J]. *地理研究*, 2019, 38(4): 869-883. [Guo Jianke, He Yao, Wang Shaobo, et al. Rank-size distribution changes and transportation network connections of the coastal container port system in Chinese mainland since 1985. *Geographical Research*, 2019, 38(4): 869-883.]
- [16] 李涛, 曹小曙, 杨文越. 珠江三角洲客货运量位序—规模分布特征及其变化 [J]. *地理科学进展*, 2016, 35(1): 108-117. [Li Tao, Cao Xiaoshu, Yang Wenyue. Rank-size distribution and evolution of passenger and freight flows in the Pearl River Delta. *Progress in Geography*, 2016, 35(1): 108-117.]
- [17] 陈伟, 修春亮, 陈金星. 中国城市间交通流强度的空间格局 [J]. *人文地理*, 2015, 29(4): 116-122. [Chen Wei,

- Xiu Chunliang, Chen Jinxing. Spatial patterns of traffic flow intensity among cities in China. *Human Geography*, 2015, 29(4): 116-122.]
- [18] 龙玉清, 陈彦光. 基于灯光数据的京津冀城市多标度异速分析 [J]. *地理科学进展*, 2019, 38(1): 88-100. [Long Yuqing, Chen Yanguang. Multi-scaling allometric analysis of the Beijing-Tianjin-Hebei urban system based on nighttime light data. *Progress in Geography*, 2019, 38(1): 88-100.]
- [19] Bettercourt L M A. The origins of scaling in cities [J]. *Science*, 2013, 340: 1438-1441.
- [20] Bettercourt L M A, Lebo J, Helbing D, et al. Growth innovation, scaling, and the pace of life in cities [J]. *PNAS*, 2007, 104(17): 7301-7306.
- [21] 王成新, 王波涛, 王翔宇. 基于结构视角的中国人口城市化与土地城市化异速增长研究 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2016, 26(8): 135-141. [Wang Chengxin, Wang Botao, Wang Xiangyu. Study on population urbanization and land urbanization allometric growth in China based on the structure. *China Population, Resources and Environment*, 2016, 26(8): 135-141.]
- [22] Batty M. The size, scale, and shape of cities [J]. *Science*, 2008, 319: 769-771.
- [23] Batty M. A theory of city size [J]. *Science*, 2013, 340: 1418-1419.
- [24] 中国科学院黄土高原综合科学考察队. 黄土高原地区土地资源 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1991. [Integrated Scientific Survey Team of Loess Plateau, CAS. Land resources in Loess Plateau Region. Beijing, China: Science and Technology of China Press, 1991.]
- [25] 中国统计局. 中国县域统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2017. [National Bureau of Statistics of China. China statistical yearbook. Beijing, China: China Statistical Press, 2017.]
- [26] 中国交通运输部. 公路工程技术标准(JTGB01—2014) [S/OL]. <https://www.doc88.com/p-0931767258907.html>. [Ministry of Communications of China. Technique standards of highway engineering (JTGB01—2014). <https://www.doc88.com/p-0931767-258907.html>.]
- [27] 郭建科, 陈园月, 于旭会, 等. 1985年来环渤海地区港口体系位序—规模分布及作用机制 [J]. *地理学报*, 2017, 72(10): 1812-1826. [Guo Jianke, Chen Yuanyue, Yu Xuhui, et al. Rank-size distribution and mechanism of port system in the Bohai Rim during the past thirty years. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(10): 1812-1826.]
- [28] 陈彦光. 城市异速标度研究的起源、困境和复兴 [J]. *地理研究*, 2013, 32(6): 1033-1045. [Chen Yanguang. The rise, fall, and revival process of allometric scaling analysis in urban studies. *Geographical Research*, 2013, 32(6): 1033-1045.]
- [29] 曹小曙, 薛德升, 阎小培. 中国干线公路网络联结的城市可达性 [J]. *地理学报*, 2005, 60(6): 903-910. [Cao Xiaoshu, Xue Desheng, Yan Xiaopei. A study on the urban accessibility of national trunk highway system in China. *Acta Geographica Sinica*, 2005, 60(6): 903-910.]
- [30] Gutierrez J. Location, economic potential and daily accessibility: An analysis of the accessibility impact of the high-speed line Madrid-Barcelona-French Border [J]. *Journal of Transport Geography*, 2001, 9(1): 229-242.
- [31] Rich D. Accessibility and economic activity: A study of locational disadvantage in Scotland [D]. Cambridge, UK: University of Cambridge, 1975.

Allometric scaling analysis of population and accessibility on the Loess Plateau from 1980 to 2016

LV Minjuan^{1,2,3,4}, CAO Xiaoshu^{2,3,4*}

(1. School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China;

2. Academy of Natural Resources and Territorial Space, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China;

3. Key Laboratory for Urbanization and Land Environment Geo-simulation in Northwest China,
Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China;

4. Loess Plateau Observation Station of Coupled Human and Natural System, Xi'an 710119, China)

Abstract: Based on the 1980, 1990, 2000, 2010, and 2016 panel data at the town and township level on the Loess Plateau, this study analyzed the population and accessibility scale structure, hierarchical system, and allometric scaling by using rank-size distribution and allometric growth model of the fractal theory. The results show that: 1) Population size was mainly small and medium, and population of 60% of the towns and townships was growing at a positive rate. The distribution of population presented a pattern of "high in the north and south, and low in the middle". Potential accessibility on the Loess Plateau tended to increase over time and the spatial distribution of potential accessibility gradually decreases from southeast to northwest. Population and potential accessibility of valley plains both are the highest. 2) The rank-size distributions of population and accessibility comply with the power-law relation, and both present a log-normal distribution. The distribution of population size changed from equilibrium to polarization, and the distribution of potential accessibility tended to be further balanced. The population rank-size distribution was characterized by dual fractals from 1980 to 2016, while the accessibility rank-size distribution had evolved from dual fractals to single fractals with 2000 as a turning point. Accessibility scale distribution tended to be stable. 3) The characteristics of population-accessibility allometric growth were clear. The 3006 towns and township mainly showed positive allometry, supplemented by negative allometry. The allometric growth types of towns and townships in the gully areas of the Loess Plateau and the valley plains were dominated by positive allometric growth with population growth. The allometric growth types of towns and townships in the hilly-gully areas of the Loess Plateau, sandy and desert areas, and earth-rock mountain areas were dominated by negative allometric growth with population decline. The irrigated regions were dominated by positive allometric growth with population growth and negative allometric growth with population decline. Finally, according to the population and accessibility allotypes and spatial distribution characteristics, some policy recommendations for the development of each region are put forward.

Keywords: population scale; accessibility; rank-size; allometric scaling; the Loess Plateau