

地理学报
Acta Geographica Sinica
ISSN 0375-5444, CN 11-1856/P

《地理学报》网络首发论文

题目：聚落规模分布一般模型的扩展演绎与区域实证
作者：常晓东，王士君，杨志鹏，李卓伟，谢铭堞，龙望
收稿日期：2024-07-23
网络首发日期：2025-04-10
引用格式：常晓东，王士君，杨志鹏，李卓伟，谢铭堞，龙望. 聚落规模分布一般模型的扩展演绎与区域实证[J/OL]. 地理学报.
<https://link.cnki.net/urlid/11.1856.P.20250410.1344.002>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

聚落规模分布一般模型的扩展演绎与区域实证

常晓东¹, 王士君^{1,2,3}, 杨志鹏⁴, 李卓伟¹, 谢铭堉¹, 龙望⁵

(1. 东北师范大学地理科学学院, 长春 130024; 2. 东北师范大学长白山地理过程与生态安全教育部重点实验室, 长春 130024; 3. 东北师范大学中国东北研究院, 长春 130024; 4. 河北师范大学地理科学学院, 石家庄 050024; 5. 贺州学院经济与管理学院, 贺州 542899)

摘要：聚落规模分布的位序—规模模型是认知城乡地域系统发展演变的重要元模型和元知识。当前位序—规模方法已被广泛应用于城镇聚落体系结构研究,但在乡村地理领域的应用相对滞后。在新时代城乡地理学交叉融合的背景下,探索城乡地域系统统一的规模分布规律是重要的理论创新,同时对建设城乡融合发展新格局具有重要现实意义。本文基于前人研究及数学抽象,开展聚落规模分布元模型的扩展—位序—累积规模模型假说演绎实验以及东北地区实证研究,在多模型、多视角、多时空之间进行对比,以期初步总结城乡聚落体系规模分布的一般模型。结论如下:①基于数学函数思想推理位序—累积规模模型的数学性质,可归纳出适合描述城乡聚落规模分布的3种潜力模型(线性模型、幂函数型、对数型),继而提出假设条件并构建多种聚落类型进行平行对比实验,有别于经验主义范式,扩展了模型适用范围,也引入了新的聚落规模分布参数。②在假说—演绎实验的多模型对比中,位序—累积规模模型相较于“罗特卡—齐夫”模型和乡村位序—规模模型优势突出,主要表现为拟合优度高、适用范围广、稳健性强,但最优位序—累积规模模型随齐夫指数(*Zipf*)取值变化呈现出分段特征。③针对中国东北地区的实证与假说—演绎实验结果高度一致。一方面,位序—累积规模模型对表征东北地区聚落体系规模分布特征效果优良,在拟合优度、适用范围、稳健性等方面均优于“罗特卡—齐夫”模型和乡村位序—规模模型。另一方面,最优位序—累积规模模型因聚落类型不同而有所差异,本质上是*Zipf*异质性而不存在显著的时间、区域异质性。④在假说演绎与区域实证的基础上,位序—累积规模模型适合作为城乡聚落体系规模分布的一般模型,可依据*Zipf*取值变化表达为幂函数型和对数函数型的分段函数。模型参数的地理意义有待进一步深入探讨,面向国家城乡聚落体系的优化重构也具有较大应用潜力。

关键词：城乡融合; 聚落规模分布; 位序—规模; 位序—累积规模模型; *Zipf*; 中国东北

1 引言

聚落是人类多种形式居住场所的统称,具有经济、社会、政治、文化等多重意义,主要表现为城市与乡村两种基本形态,也是人文地理学的重要研究对象^[1-3]。聚落地理学是人文地理学的重要分支学科之一,是研究聚落规模分布、职能分工、空间结构及其演

收稿日期: 2024-07-23; 修订日期: 2025-03-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(42171198, 42201216, 42071219); 中国博士后科学基金项目(2022M721303) [Foundation: National Natural Sciences Foundation of China, No.42171198, No.42201216, No.42071219; China Postdoctoral Science Foundation, No.2022M721303]

作者简介: 常晓东(1997-), 男, 河南林州人, 博士生, 研究方向为城乡地域系统空间结构及其区域效应。

E-mail: changxd674@nenu.edu.cn

通讯作者: 王士君(1963-), 男, 黑龙江延寿人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为城市地理学和经济地理学。

E-mail: wangsj@nenu.edu.cn

变规律的学科,可划分为城市地理和乡村地理两大分支部分。但中国聚落地理学研究受到城乡关系的深刻影响^[4]。从1949年中华人民共和国成立到21世纪初,中国整体城乡关系的二元结构导致了我国聚落地理学研究的二元分化^[5]。进入21世纪以来,中国城乡关系正在发生由“城乡分割”向“城乡融合”的历史性变革^[6]。由此,中国新时代城乡地理学交叉融合的聚落地理学逐渐成为研究前沿。

聚落地理研究经历了“系统化”转向,特别是城市地域系统与乡村地域系统理论日臻成熟。聚落规模分布(Settlement Size Distribution)是认知城乡地域系统发展演变的重要视角之一。城市地域系统是一定地域范围内由多个具有密切经济社会联系的城市地域及其腹地分化整合而成的复杂地理系统^[2,7]。在城市地域系统中,城市规模分布决定了人口、土地、产业、设施等要素的空间分布和组合结构,进而影响区域城市体系中的城市地位与分工协作,也在经济、社会、生态等维度表现出一定的规模分布绩效^[8]。乡村地域系统是由人文、经济、资源与环境相互联系、相互作用下构成的、具有一定结构、功能和区际联系的乡村空间体系^[9]。在乡村地域系统中,乡村规模分布决定了其农业人口、农业产业、农业土地、农业设施等主导要素的空间配置与组合特征,进而影响了乡村地域的人业关系、人地关系、业地关系,表现为乡村景观类型的空间分异与乡村地域系统的多功能。事实上,城市与乡村是一个有机联结体与命运共同体^[10]。一方面,城市由乡村孕育而生,乡村为城市发展提供了必要的农业资料与生态服务;另一方面,广大乡村地域是城市发展的腹地,城镇化深刻影响了乡村地域的结构与功能,是乡村地域系统发展演变的核心外缘动力。因此,聚落规模分布决定了城乡地域系统核心要素的空间配置,进而深刻影响着城市与乡村的相互作用与城乡地域的功能分工。2019年5月发布的《关于建立健全城乡融合发展体制机制和政策体系的意见》明确指出,城乡融合发展的关键在于促进城乡要素的自由流动和合理配置,即实现城乡地域系统相对适宜的聚落规模分布结构。

聚落规模分布在城市地理、乡村地理和区域地理研究中获得了高度关注,但并未形成统一的聚落规模分布法则,位序—规模模型是认知城乡地域系统规模结构的重要元模型和元知识。此前位序—规模方法在城市地域系统结构研究中获得了广泛关注^[11-12],齐夫指数(Zipf)模型逐渐成为城市地理学者公认的城市规模分布统一法则,但是大多为应用型研究较少有理论和方法创新。从乡村地理领域来看,位序—规模应用研究起步较晚,部分学者认为可直接使用城市位序—规模法则(Rank-Size Rule)^[13],部分学者则提出了乡村位序—规模法则^[14-15],因此并未形成乡村聚落体系规模分布的统一法则。从区域地理领域来看,近年来在城乡融合关系背景下区域聚落体系研究显著增多,但是大多为借鉴城市地理和乡村地理的相关方法^[16],也未形成公认的区域聚落体系规模分布的统一法则。当前统一法则的尚不成熟,一方面使得聚落规模分布理论的创新发展缺乏有效的模型支撑和经验佐证,另一方面在实践应用中往往就城市论城市、就乡村论乡村,难以有效对接城乡融合发展的现实需求。结合城乡地域系统理论来看,城市聚落与乡村聚落的规模分布具有逻辑上的相似性,多等级序列城市由乡村孕育而生,多等级序列乡村作为城市腹地,且在城乡融合发展背景下城市与乡村的联系日益紧密,要素规模分布逐渐呈现出双向塑造过程^[17]。因此,聚落地理学的规模分布理论亟待在城乡地域系统视角下继续创新发展和探索统一法则。值得注意的是,假说演绎法是近年中国人文地理学研究的重要方法创新^[18],为本文提供了重要的方法论支撑,本文将在此方法论指导下开展研究。

综上所述,在中国新时代城乡地理学交叉融合的背景下,探索城乡地域系统统一的聚落规模分布规律是重要的理论创新,同时对建设城乡融合的区域高质量发展新格局具有重要意义。本文的核心科学问题是:在城乡地域系统中,城市聚落与乡村聚落是

否存在统一的规模分布规律?可分解为以下问题:①如何基于已有的聚落规模分布研究进一步扩展其理论方法并挖掘潜力模型?②基于演绎推理与区域实证,城市位序—规模模型、乡村位序—规模模型以及潜力模型在城乡聚落体系中的适用性如何?③基于以上探究,是否存在城乡聚落体系规模分布的一般规律模型?地理意义与应用前景如何?

2 聚落规模分布模型研究回顾

聚落规模分布模型经历了由简单统计描述到复杂函数拟合、由经典模型到前沿方法的继承性发展,其研究对象也经历了由早期关注城市聚落体系到现阶段城市聚落与乡村聚落并重的研究转向,根本目标是对聚落规模分布特征的精准刻画与内在规律的深入挖掘。针对多类型聚落体系的规模分布问题,学者们应用多种规模分布模型进行拟合优度、参数趋势对比,位序—累积规模模型在城市聚落与乡村聚落体系研究中表现出明显优势,有望成为城乡聚落规模分布的一般模型。

2.1 经典的规模分布模型

聚落规模分布研究最早围绕城市聚落体系展开,主要包括城市首位律(Law of the Primate City)、城市金字塔和位序—规模法则3大类方法。其中城市首位律最早被Jefferson提出^[19],特别是城市首位度成为城市规模分布特征的公认核心指标,同时也衍生出了4城市指数、11城市指数等相关概念,这为早期城市规模分布研究提供了简单的描述性统计指数,对当下中国强省会战略也具有一定的理论支撑^[20]。城市金字塔是对城市规模分布的几何化直观展示,但存在类似于可变面元的等级划分标准的分歧,不同的等级划分标准往往会产生不同的城市金字塔形态,Davis的两倍数分级获得城市地理学者的广泛认可^[21]。相较于前两者,位序—规模法则为城市规模分布研究提供了一种拟合函数化表达,对揭示城市规模分布的一般规律意义重大。

在位序—规模法则^①中,城市位序与城市规模是两大核心变量。Auerbach等给出了二者的隐函数关系^[22],即二者的幂之积为常数(表1模型5),相较而言罗特卡模型更加具有进步意义;Singer^[23]与Zipf^[24]则完成了函数的显性化表达,Singer使用规模作为自变量(表1模型8),而齐夫(Zipf)模型选择位序作为自变量(表1模型7)。当前Zipf模型作为理想分布模型被广泛接受,由此扩展的位序—规模模型实际是罗特卡模型的一般化,因此本文把此模型称为“罗特卡—齐夫”模型(表1模型6)。同时经过数学验证,辛格模型与“罗特卡—齐夫”模型存在数理上的等价,两大模型的 q 值互为倒数。此外,在位序与规模的双对数回归中,关于截距项是否等价于首位城市,学界存在分歧。事实上,在多数学者的具体实证研究中,截距项往往并不等价于首位城市规模^[2]。

对比三大经典方法,各有利弊,对3种方法统筹运用才能刻画聚落规模分布的局部特征和全局规律。城市首位律简便通俗,但仅能反映城市规模分布的首位特征,是对城市规模分布的一种局部刻画;城市金字塔过分依赖等级划分标准而普适性较弱,仅方便直观了解城市规模分布特征;位序—规模法则是对城市规模分布全局特征的数学化表达,特别是“罗特卡—齐夫”模型,对解释城市聚落体系全局规律意义重大。

2.2 规模分布模型在城乡聚落规模分布研究中的应用

由于中国城乡关系的二元结构以及城乡数据统计口径和来源的差异,中国城乡聚落规模分布研究分化为城市聚落体系与乡村聚落体系规模分布两大部分。且由于城市与乡村在中国城乡互动中的不对等地位,城镇聚落体系规模分布研究明显领先于乡村。

① 广义的位序—规模法是指代描述聚落位序及其规模的一切模型函数的统称,狭义的位序—规模法常常指代“罗特卡—齐夫”模型。本文所提的位序—规模法则(方法、模型)为广义。

表 1 聚落规模分布模型梳理
Tab. 1 Summary of settlement scale distribution model

模型分类	模型序列	模型表达	模型解释
首位度指数	模型 1	$\varepsilon = P_1/P_2$	首位度(2城市指数)
	模型 2	$\varepsilon = P_1/(P_2 + P_3 + P_4)$	4城市指数
	模型 3	$\varepsilon = P_1/(P_2 + P_3 + \cdots + P_{11})$	11城市指数
聚落金字塔	模型 4	$y = \int_a^b f(x) dx$	y 为聚落规模在 $[a, b]$ 内的聚落数目; $f(x)$ 为聚落数量密度,理论上随着区间端点值 a, b 的增大, y 不断减小
位序—规模模型	模型 5	$P_i R_i = K$	Auerbach 模型
	模型 6	$P_i = P_1 \times R_i^{-q}$ 或 $\ln P_i = \ln P_1 - q \ln R_i$	Lotka 模型的一般化,通常情况下双对数回归的截距项并不等于首位聚落规模对数
	模型 7	$P_i = P_1 \times R_i^{-1}$ 或 $\ln P_i = \ln P_1 - \ln R_i$	Zipf 模型,即 Lotka 模型的特殊案例
	模型 8	$R_i = K \times P_i^{-a}$ 或 $\ln R_i = \ln K - a \ln P_i$	Singer 模型的一般化
	模型 9	$P_i = P_1 \times \delta^{i-1}$ 或 $\ln P_i = \ln P_1 + (i-1) \ln \delta$	$\delta = P_{i+1}/P_i, R_i = i$,乡村聚落规模分布符合等比数列
位序—累积规模模型	模型 10	$S_i = S_1 + \beta \ln N_i$	N_i 为到位序 R_i 时候的聚落数目,则 $N_i = R_i = i, S_1$ 即为首位聚落规模 P_1
	模型 11	$S_i = \begin{cases} a \ln N_i + b & (1 \leq PI < 1.20225) \\ b e^{a \ln N_i} & (PI \geq 1.20225) \end{cases}$	N_i 含义同模型 10, PI 为帕累托指数,由模型 10 的一般化为分段位序—累积规模模型

注: P_i 均代表从大到小第 i 位聚落的规模, R_i 为聚落 i 的位序, S_i 为从第 1 位聚落到第 i 位聚落的累积规模。

中国城市聚落体系规模分布研究兴起于20世纪80年代,主要聚焦于城镇体系中的城镇等级规模结构及其演变,特别是对位序—规模法则的验证^[25]以及对城镇合理规模的探讨^[26]。伴随着中国城镇化进程的快速推进以及多种城镇化地域形态的产生,城市聚落体系规模分布研究开始关注都市圈、城市群、城市网络的规模分布问题^[27-29]。从模型选择来看,“罗特卡—齐夫”模型在城市聚落体系中获得了高度关注,多位学者验证发现中国城市聚落体系较为均衡,但存在显著空间异质性。同时在分区研究中,学者们使用局部与全局指标相结合的方法来考察城市聚落体系规模分布的区域差异^[30]。从变量的选择来看,核心是对城市规模的理解,分为综合规模指数和单一规模指数,主要包括人口、经济、建成区规模三大视角。学者们的共识是城市规模是城市综合实力和发展水平的外在体现,是城市未来发展和参与区域互动的基础条件。

中国乡村聚落体系规模分布研究起步较晚。一方面乡村的自给自足本身使得乡村聚落之间的经济社会联系并不强烈;另一方面是在对外开放的大城镇化背景下中国大多乡村相继空心化,二者共同决定了中国乡村地域系统整体发展水平不高,聚落规模分布并未形成有效体系。21世纪10年代,伴随乡村地理学的发展中国乡村聚落体系研究逐渐获得关注,主要集中在乡村聚落空间分布格局及影响因素^[31]、乡村聚落体系规模分布^[13]、乡村功能与类型^[32-33]、乡村空间重构以及空间优化^[34-35]等方面。从模型选择来看,乡村聚落体系研究主要有对“罗特卡—齐夫”模型的借用以及乡村位序—规模法则(表1模型9)的应用。从变量的选择来看,核心是参考城市规模的概念,乡村地理学者基于“人口—土地—产业”提出了乡村规模概念^[36],但受限于乡村数据的可获得性常选择居民点用地规模作为乡村聚落的规模指数。

在新时代城乡融合背景以及遥感、经济社会普查等地理大数据方法推动下,统筹城镇和乡村的城乡聚落体系规模分布研究也逐渐兴起。从研究区域选择来看,包括东部农业现代化地区^[37]、中部传统农区^[38]和汾河流域^[39]以及西部干旱区绿洲^[40],鲜有关于东北地区城乡聚落体系的研究,且总体研究尺度较小。从模型选择来看,大多数学者依然沿用了“罗特卡—齐夫”模型来研究城乡聚落体系,事实上可能增加了模型误差,且“罗特

卡—齐夫”模型在城乡聚落体系研究中的适用性也有待进一步论证。从变量选择来看, 受限城乡数据的统计口径的差异, 当前大多学者选择土地利用斑块数据作为城乡聚落的规模指数。

2.3 城乡聚落规模分布的新模型进展

近年来, 位序—累积规模法则被城市地理学者发现并逐步应用于城乡聚落体系研究中^[18, 41-42]。相较于位序—规模法则, 位序—累积规模法则(表1模型10)的发现同样具有经验主义范式, 且在具体城市聚落体系研究中的拟合表现要优于“罗特卡—齐夫”模型^[41]。在乡村聚落体系研究中, 位序—累积规模法则(表1模型11)相较于乡村位序—规模法则也表现出较强优越性^[18]。既有的研究事实表明, 无论在城市还是乡村地域系统的聚落规模分布研究, 位序—累积规模法则均有较强的应用潜力, 有望成为城乡地域系统聚落规模分布的一般模型。位序—累积规模法则尽管应用潜力巨大, 但进一步科学化、理论化与应用拓展方面仍面临以下关键问题: ①对模型本身数学基础的梳理, 可以基于怎样的数学工具和逻辑推理过程得到位序—累积规模模型, 位序—累积规模模型有哪些函数形式, 从而使得模型具有扎实的数理支撑而不仅仅停留于经验主义层面。②对模型的有效性比较与稳健性检验, 即将位序—累积规模模型、“罗特卡—齐夫”模型以及乡村位序—规模法则分别应用于不同区域或者不同时间截面, 前者是否相较于后两者依然有效和稳健。在位序—累积规模模型总体有效和稳健的前提下, 基于不同情景哪种类型的位序—累积规模模型更加适用, 据此适合城乡聚落规模分布的一般模型是否表达为一个分段函数。③对模型地理意义的诠释, 任何地理数学模型必须保证地理意义和数学方法的辩证统一, 位序—累积规模模型的地理意义是什么, 其模型参数取值反映了怎样的聚落体系特征。④对模型关键参数的总结, 类似于“罗特卡—齐夫”模型中的齐夫指数 q 值, 有待进一步探讨是否存在城乡聚落体系规模分布的理想参数值。

3 位序—累积规模模型及其假说演绎实验

3.1 位序—累积规模模型的数学基础

幂函数、对数函数和指数函数3大基本初等函数是地理数学建模中常用的3种模型, 对总结地理要素分布特征、解释地理系统基本规律、探求地理过程运行机制意义重大。在此过程中, 地理数学建模工作时时刻面临着“最优化”与“最简化”的权衡^[43]。值得注意的背景是, 18世纪初英国牛顿学派代表人物之一数学家Brook Taylor的无穷级数定律引发了巨大轰动, 幂函数及其衍生的初等函数实现了对大多数常见函数的近似逼近, 幂函数工具的普适性获得了严密的数理支撑和科学权威的一致认可。

聚焦于聚落规模分布问题, 传统位序—规模法则是对规模变量 P_i 与规模序列变量 R_i 关系的拟合逼近(式(1))。其中, “罗特卡—齐夫”模型正是采用了幂函数来解决这一问题, 其数学意义是随着位序的递增聚落规模呈现递减的变化趋势, 且减小的幅度越来越小。相较于前者, 新兴起的位序—累积规模模型则是对累积规模变量 S_i 与规模序列变量 R_i 关系的拟合逼近(式(2))。在幂函数可能最优情景下, 依据概率论与数理统计相关知识, 将前者视为密度模型, 而后者是前者的累积分布模型, 相对前者拟合优度更大^[41]。

$$P_i = f(R_i) \quad (1)$$

$$S_i = g(R_i) = \sum_{k=1}^i P_k \quad (2)$$

可进一步推导可知, S_i 具有3大性质: ① S_i 恒大于0; ② S_i 为 R_i 的递增函数; ③ S_i 为 R_i

的上凸函数（即 S_i 的增长速度越来越慢）。性质①是显然的；对于性质②， $S_i - S_{i-1} = P_i > 0$ ，故 S_i 为 R_i 的递增函数；对于性质③， $\frac{d^2 S_i}{dR_i^2} \approx \frac{dS_{i+1}}{dR_{i+1}} - \frac{dS_i}{dR_i} \approx (S_{i+1} - S_i) - (S_i - S_{i-1}) = P_{i+1} - P_i < 0$ ，故 S_i 为 R_i 的上凸函数。根据以上的理论分析与数理推导，可归纳出3种潜在高度适配城乡聚落的规模分布模型（表2）：线性位序—累积规模模型，幂函数型位序—累积规模模型，对数型位序—累积规模模型。

3.2 基于位序—累积规模模型的聚落规模分布一般假说

尽管已有研究围绕位序—累积规模模型初步进行了假说—演绎实验，但仍存在以下值得商榷之处^[18, 41]：① 对聚落数目的限定没有严格科学依据，或多或少的聚落数目都会影响实验结果，如某研究直接把聚落数目限定为500个，发现与其他研究相异的分段位序—累积规模模型。② 在假设中直接限定首位聚落及聚落数目，在“罗特卡—齐夫”理想分布下无法确保最低位序的聚落规模一定符合研究的对象要求，例如最低位序的聚落规模为2万人但是研究对象是乡村聚落体系。③ 相关研究中往往就城市体系论城市体系，就乡村体系论乡村体系，并未对统一的城乡聚落体系进行演绎以及开展对城市聚落体系、乡村聚落体系、城乡聚落体系的对比研究。

国际上常以10万人口作为城市的识别门槛^[44-45]，国内学者在识别城市时也多使用10万人口作为划分设市城市与县城的界限^[20, 46]，同时参考《关于调整城市规模划分标准的通知》标准及中国乡村振兴战略的现实需求，科学确定聚落体系研究规模阈值。本文提出如下假设：假设1：在均质平原上假设存在A、B、C 3个聚落体系，3个聚落体系的规模特征为：A聚落体系，首位聚落规模为1000万人口，末位聚落规模为10万人口；B聚落体系，首位聚落规模为10万人口，末位聚落规模为0.1万人口；C聚落体系，首位聚落规模为1000万人口，末位聚落规模为0.1万人口。假设2：在A、B、C 3个聚落体系符合“罗特卡—齐夫”模型的情况下，其也一定高度符合3种位序—累积规模模型。

显然，A为典型的城市聚落体系，B为典型的乡村聚落体系，C为城乡聚落体系。为计算方便，规定聚落体系最大聚落数目不超过10000个。同时为探究结果的稳健性和异质性，Zipf指数在(0, 1)与[1, +∞]分别取若干值，具体实验设计参数如表3所示。

3.3 基于位序—累积规模模型的聚落规模分布实验结果

综合实验结果来看，假设2得到了较为充分地证实。具体来看：① 3种位序—累积规模模型整体拟合优度较好，无论对不同的Zipf指数还是对不同的聚落体系簇（表4）；

表 2 3种潜在的位序—累积规模模型

Tab. 2 Three potential rank-cumulative size models

模型编码	模型表达式	参数特征
M1	$S_i = a \times R_i + b$	$a > 0$
M2	$S_i = a \times (R_i)^b$	$a > 0, 0 < b < 1$
M3	$S_i = a \times \ln R_i + b$	$a > 0$

注： S_i 、 R_i 的含义同公式(1)~(2)，不同模型中 a 、 b 参数并不一定相同。

表 3 聚落体系实验参数表

Tab. 3 Experimental parameters of settlement system

聚落体系簇	聚落体系编号	首位聚落规模(万人)	末位聚落规模(万人)	Zipf指数
A	A1	1000	10	0.5
	A2	1000	10	1
	A3	1000	10	1.5
	A4	1000	10	2
B	B1	10	0.1	0.5
	B2	10	0.1	1
	B3	10	0.1	1.5
	B4	10	0.1	2
C	C1	1000	0.1	0.8
	C2	1000	0.1	1
	C3	1000	0.1	1.5
	C4	1000	0.1	2
	C5	1000	0.1	3
	C6	1000	0.1	4
	C7	1000	0.1	5
	C8	1000	0.1	6
	C9	1000	0.1	7

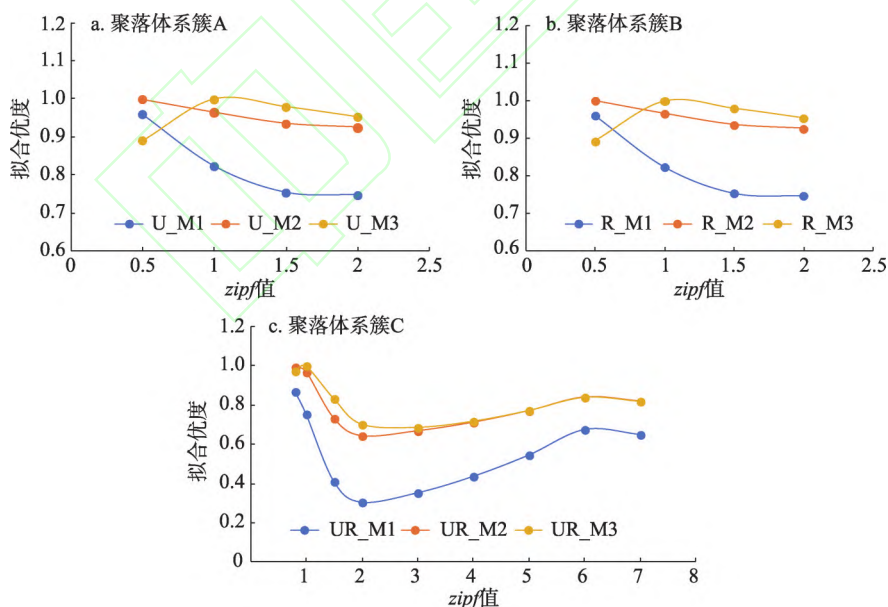
表 4 拟合实验结果

Tab. 4 Fitting experimental results

聚落体系簇	聚落体系编号	Zipf指数	模型类型	a 估计值	b 估计值	拟合优度
A	A1	0.5	线性	16.00	51904.00	0.96
			幂函数	1764.60	0.51	1.00
			对数	44596.00	-234283	0.89
	A2	1	线性	27.76	2837.40	0.82
			幂函数	1420.60	0.29	0.96
			对数	955.91	762.22	1.00
	A3	1.5	线性	42.52	1445.20	0.75
			幂函数	1158.10	0.23	0.93
			对数	367.81	1118.00	0.98
	A4	2	线性	49.09	1141.80	0.75
			幂函数	1070.50	0.18	0.92
			对数	229.05	1065.9	0.95
B	B1	0.5	线性	0.16	519.04	0.96
			幂函数	17.65	0.51	1.00
			对数	445.96	-2342.80	0.89
	B2	1	线性	0.28	28.37	0.82
			幂函数	14.21	0.29	0.96
			对数	9.56	7.62	1.00
	B3	1.5	线性	0.43	14.45	0.75
			幂函数	11.58	0.23	0.93
			对数	3.68	11.18	0.98
	B4	2	线性	0.49	11.42	0.75
			幂函数	10.71	0.18	0.92
			对数	2.29	10.66	0.95
C	C1	0.8	线性	1.43	14689.00	0.87
			幂函数	2553.90	0.26	0.99
			对数	4389.40	-14186	0.97
	C2	1	线性	0.30	7290.90	0.75
			幂函数	2909.80	0.13	0.97
			对数	998.19	592.56	1.00
	C3	1.5	线性	0.69	2273.80	0.41
			幂函数	1745.10	0.06	0.73
			对数	136.02	1734.90	0.83
	C4	2	线性	1.58	1519.50	0.31
			幂函数	1318.80	0.05	0.64
			对数	75.01	1326.60	0.70
	C5	3	线性	4.35	1134.20	0.35
			幂函数	1080.70	0.04	0.67
			对数	45.97	1082.70	0.69
	C6	4	线性	5.56	1039.90	0.44
			幂函数	1025.60	0.03	0.71
			对数	29.45	1026.00	0.72
	C7	5	线性	5.75	1009.30	0.55
			幂函数	1008.20	0.0189	0.77
			对数	19.30	1008.20	0.77
	C8	6	线性	5.31	999.19	0.68
			幂函数	1002.30	0.01	0.84
			对数	12.72	1002.40	0.84
	C9	7	线性	2.55	999.74	0.65
			幂函数	1001.20	0.01	0.82
			对数	6.14	1001.20	0.82

② 从3种位序—累积规模模型来看,整体上对数模型拟合优度最好,幂函数模型次之,线性模型最差(表4)。③ 模型拟合优度随 $Zipf$ 指数变化呈现出一定的区间单调性,存在若干极值点。在 $0 < Zipf < 1$ 时,模型拟合优度随 $Zipf$ 增大而增大,在 $1 < Zipf < 2$ 时,模型拟合优度随 $Zipf$ 增大而减小(图1)。④ 对聚落体系簇C,探讨了更多的 $Zipf$ 取值,在 $2 < Zipf < 6$ 时,模型拟合优度随 $Zipf$ 增大而增大,在 $Zipf > 6$ 时,模型拟合优度总体随 $Zipf$ 增大而减小(图1)。事实上现实聚落体系的 $Zipf$ 值普遍在2以内,因此探讨较大的 $Zipf$ 值意义不大。⑤ 虽然此前已有研究指出了对数型位序—累积规模模型更加合适^[41],但并未进行系统地假设实验和模型对比研究,值得注意的是,本实验发现对数型位序—累积规模模型在 $Zipf > 1$ 时更加适用,且随着 $Zipf$ 指数增大而拟合优度下降,逐渐与幂函数型模型的拟合优度相近;而在 $0 < Zipf < 1$ 的情形下,对数型位序—累积规模模型表现并不突出。这种分段特征在黄万状等的假设实验中也达到了验证^[18]。⑥ 结合中国城乡发展的实际情况,城乡聚落体系的 $Zipf$ 值部分小于1,部分大于1^[13, 37],不同聚落体系分布于平原、丘陵、高原等多种地貌类型区域,交通、河流、山川、谷地等因素深刻影响着聚落空间分布,因此聚落体系分布存在显著的区域异质性。

经过上述假设演绎实验,在均质平原以及高度符合“罗特卡—齐夫”模型的理想条件下,虚拟的城乡聚落体系高度符合本文归纳的3种位序—累积规模模型,特别是对数型和幂函数型位序—累积规模模型拟合效果优良,针对不同 $Zipf$ 取值以及聚落类型均表现出较强稳健性。但考虑到假设条件的理想化、中国聚落分布的区域差异性与作用因素的复杂性,为建立统一的城乡聚落体系规模分布模型,依然有待针对具体区域开展实证研究。



注: U代表城市聚落, R代表乡村聚落, UR代表城乡聚落, M1、M2、M3含义与表2对应

图1 不同聚落体系和 $Zipf$ 值情景下的拟合优度分析

Fig. 1 Analysis of goodness of fit under different settlement systems and $Zipf$ value scenarios

4 中国东北地区的实证

4.1 研究区域与数据

东北地区是一个相对独立的自然地理和社会经济地理单元,空间范围包括黑龙江、

吉林、辽宁以及内蒙古东部4盟市(赤峰市、通辽市、兴安盟、呼伦贝尔市)。从自然禀赋条件来看,平原广袤、土地肥沃、降水充沛、资源丰富,农业生产基础条件良好,是中国农业农村现代化的重要试验区域,乡村聚落体系发展有其自身特征^[33]。从经济社会发展过程来看,由于相对于中国其他区域较早经历工业化过程,特别是中华人民共和国成立初期的工业化建设使得其城镇化进程较早,城镇和城镇体系也发育较早。在改革开放后伴随资源枯竭、体制机制“不适”的发展停滞问题,城镇化也相对停滞,由此使得城镇体系更加具有特殊性和典型性^[47]。21世纪初在振兴东北这一国家战略推动下,东北地区城镇化获得了新的发展契机并经历了全新的空间重构过程^[48]。综上,东北地区城乡聚落体系发育演变具有一定典型特征,属于中国城镇化和城镇体系的重要“类型区域”之一,且与本文假设条件高度接近,适合作为实证研究区域(图2)。截至2022年,东北地区国内生产总值5.75万亿元,常住人口9700万人,常住人口城镇化率为69%,地级区划40个,县级区划321个,乡镇级区划4477个,行政村22496个,社区27071个,拥有哈尔滨、长春、沈阳、大连4个副省级城市,一个国家级城市群哈长城市群,一个区域级城市群辽中南城市群,按照行政区划可划分为黑龙江、吉林、辽宁、蒙东4个子区域。

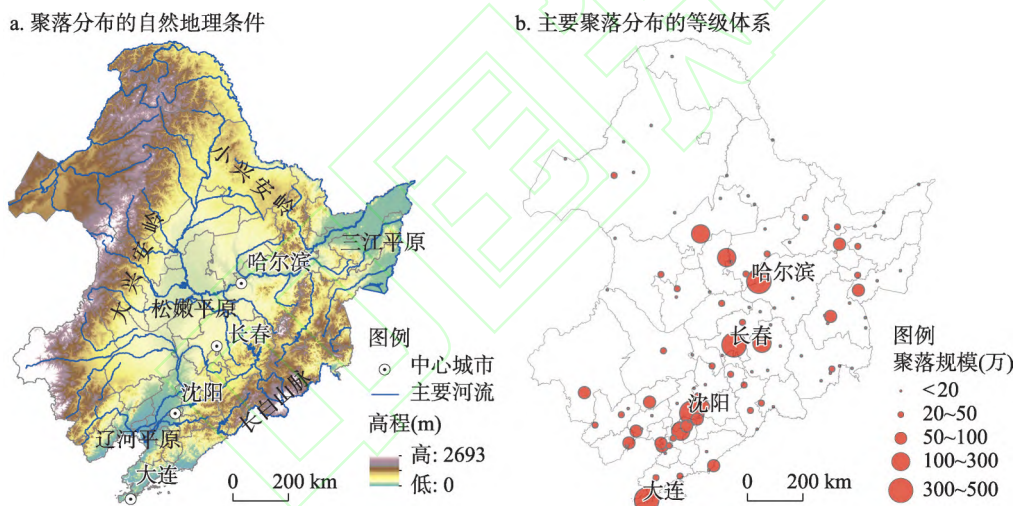


图2 中国东北地区主要聚落空间分布的自然条件与等级特征

Fig. 2 The natural conditions and hierarchical characteristics of the spatial distribution of the main settlements in Northeast China

参考前人的研究^[18, 20, 38, 40], 本文选取人口和聚落用地规模两个指标测度聚落规模。鉴于数据的可获得性、科学性、可比性、满足分辨率等要求, 在对城市聚落体系的测度中, 同时使用人口规模(城区常住人口规模)和用地规模(城市建成区面积); 而对乡村聚落体系和城乡聚落体系的测度中主要选择用地规模(城镇、乡村居民点实际用地斑块面积)。其中城区常住人口数据、城市建成区面积数据来源于《中国城市建设统计年鉴》, 时间跨度为2011—2021年; 城镇、乡村居民点实际用地斑块面积数据来自中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>)的30 m分辨率土地利用数据, 数据时间为2010、2015和2020年。基础地理信息数据包括东北地区边界数据和相关省级、市级、县级行政区边界数据。其中县级行政区边界数据来源于中国国家测绘中心发布的2017版中国1:100万矢量地图数据(<http://www.ngcc.cn/ngcc>), 其他边界数据是合并其范围内的县级行政区界线获得。关于行政区划数量数据, 县级及其以上区划数据来自地图矢量数据,

乡镇、村级数据来自基于Python的百度地图区划数据爬取，经过与所属县级区划匹配获得具体数量。

4.2 研究思路与模型设定

首先检验“罗特卡—齐夫”模型（传统的城市规模分布模型）、乡村位序—规模模型以及3种位序—累积规模模型（表2）分别在城镇聚落体系、乡村聚落体系和城乡聚落体系研究中的有效性；尔后分析东北地区城镇聚落体系、乡村聚落体系、城乡聚落体系的规模分布特征；最后结合前述假设演绎实验，尝试总结出适合城乡聚落规模分布研究的一般模型。结合表2归纳出的3种位序—累积规模模型（M1、M2、M3）以及原有的“罗特卡—齐夫”模型（M0_1）、乡村位序—规模模型（M0_2）共计5种模型，具体模型表达式及参数见表5。其中在城镇聚落体系规模分布实证中，选择M0_1、M1、M2、M3共计4种模型，一方面可验证比较原有“罗特卡—齐夫”模型与位序—累积规模模型在城镇聚落体系研究中的适用性，另一方面可进一步分析东北地区城镇聚落体系的极化与扩散特征。在乡村聚落体系及整个城乡聚落体系规模分布实证中，选择M0_1、M0_2、M1、M2、M3共计5种模型，一方面可验证“罗特卡—齐夫”模型和乡村位序—规模模型在乡村聚落体系乃至整个城乡聚落体系中的适用性，此前已有学者在中原农区乡村聚落体系研究中比较了二者的适用性；另一方面可对比位序—累积规模模型相较于前两种模型的有效性，并分析东北地区乡村聚落体系以及整个城乡聚落体系的极化与扩散特征。

表 5 聚落体系规模分布实证研究的模型设定
Tab. 5 Model setting of empirical study on size distribution of settlement system

模型编码	模型名称	原始表达式	回归表达式	解释变量	被解释变量
M0_1	“罗特卡—齐夫”模型	$P_i = a \times (R_i)^{-b}$	$\ln P_i = \ln a - b \times \ln R_i$	$\ln R_i$	$\ln P_i$
M0_2	乡村位序—规模模型	$P_i = a \times (b)^{(R_{i-1})}$	$\ln P_i = \ln a + \ln b \times R_{i-1}$	R_{i-1}	$\ln P_i$
M1	线性位序—累积规模模型	$S_i = a \times R_i + b$	$S_i = a \times R_i + b$	R_i	S_i
M2	幂函数型位序—累积规模模型	$S_i = a \times (R_i)^b$	$\ln S_i = \ln a + b \times \ln R_i$	$\ln R_i$	$\ln S_i$
M3	对数型位序—累积规模模型	$S_i = a \times \ln R_i + b$	$S_i = a \times \ln R_i + b$	$\ln R_i$	S_i

注：P_i、S_i、R_i的含义同公式(1)~(2)；不同模型中a、b参数并不一定相同。

4.3 面向城镇聚落体系的规模分布实证

从人口视角来看，回归分析参数估计结果显著性良好，模型均有较强的解释力（表6）。首先，4种模型对东北地区城镇聚落体系规模分布的拟合效果良好，R²基本都在0.8以上，符合经典的“罗特卡—齐夫”模型，也符合由此衍生出的位序—累积规模模型。其次，相较于经典“罗特卡—齐夫”模型，位序—累积规模模型在东北地区城镇聚落体系的实证中表现更好，4种模型整体的适用性排序是：M3>M2>M0_1>M1，即对数型位序—累积规模模型最好，其次是幂函数型位序—累积规模模型，然后是“罗特卡—齐夫”模型，最差的是线性位序—累积规模模型。最后，对比不同时间截面和不同应用区域发现，最佳模型的区域异质性、时间异质性并不明显，对数型位序—累积规模模型的拟合效果高度稳健（图3）。用地规模是城镇规模的重要代表性指标，可与人口规模视角下的城镇聚落体系规模分布进行对比。结果显示用地规模视角下的结论与人口视角相似，回归参数的估计结果、模型的有效性以及适用性均表现出较强的稳健性（表7、图4）。

综合“人—地”视角，①在模型选择上，东北地区城镇聚落体系的人地要素规模分布虽然符合经典的“罗特卡—齐夫”模型，但更适合于对数型位序—累积规模模型。②在分布特征上，东北地区城镇聚落体系的人地要素规模分布特征整体均衡，接近理想分布，但存在格局的空间分异性和演变的路径差异性（图5）。从空间格局来看，蒙东地区人地

表6 人口视角下东北地区城镇聚落体系规模分布的回归结果

Tab. 6 Regression results of the size distribution of urban settlement system in Northeast China from the perspective of population

区域	参数	2011年				2016年				2021年			
		M0_1	M1	M2	M3	M0_1	M1	M2	M3	M0_1	M1	M2	M3
东北地区	斜率	-1.05	29.79	0.39	1021.87	-1.08	29.94	0.39	1030.48	-1.13	25.93	0.36	931.43
	截距	7.06	2181.30	6.73	-31.37	7.14	2238.43	6.75	2.18	7.19	2272.90	6.81	206.69
	R^2	0.94	0.82	0.95	0.99	0.93	0.82	0.94	0.99	0.93	0.80	0.93	1.00
蒙东	斜率	-1.20	15.15	0.48	71.36	-1.32	15.08	0.44	71.35	-1.35	15.01	0.47	71.27
	截距	4.61	95.65	4.42	73.00	4.76	109.09	4.56	86.03	4.75	97.61	4.43	74.26
	R^2	0.93	0.88	0.97	1.00	0.92	0.87	0.97	0.99	0.87	0.86	0.96	0.99
辽宁	斜率	-1.13	42.12	0.39	487.93	-1.10	44.59	0.39	498.00	-1.15	41.34	0.37	465.13
	截距	6.49	964.35	6.38	409.03	6.45	953.69	6.38	405.48	6.47	966.19	6.41	449.42
	R^2	0.97	0.84	0.97	0.99	0.95	0.85	0.97	0.99	0.95	0.84	0.96	0.99
吉林	斜率	-0.98	23.41	0.36	237.39	-0.99	22.64	0.35	231.33	-1.10	18.35	0.29	196.91
	截距	5.52	468.65	5.78	232.01	5.53	480.04	5.81	247.42	5.60	542.62	5.98	334.00
	R^2	0.98	0.90	0.99	0.99	0.98	0.90	0.99	0.99	0.98	0.87	0.99	1.00
黑龙江	斜率	-1.26	25.57	0.34	291.51	-1.29	24.50	0.33	288.88	-1.28	19.88	0.30	247.68
	截距	6.21	667.34	6.08	337.99	6.27	705.91	6.14	370.21	6.14	666.38	6.10	366.02
	R^2	0.94	0.81	0.97	0.99	0.94	0.80	0.97	0.99	0.95	0.81	0.97	0.99

注：表中深色底纹的单元格为更优的拟合结果，划线的单元格代表未通过 $p=0.1$ 的显著性检验，未划线的单元格代表均通过显著性检验，后续回归分析结果表格同。

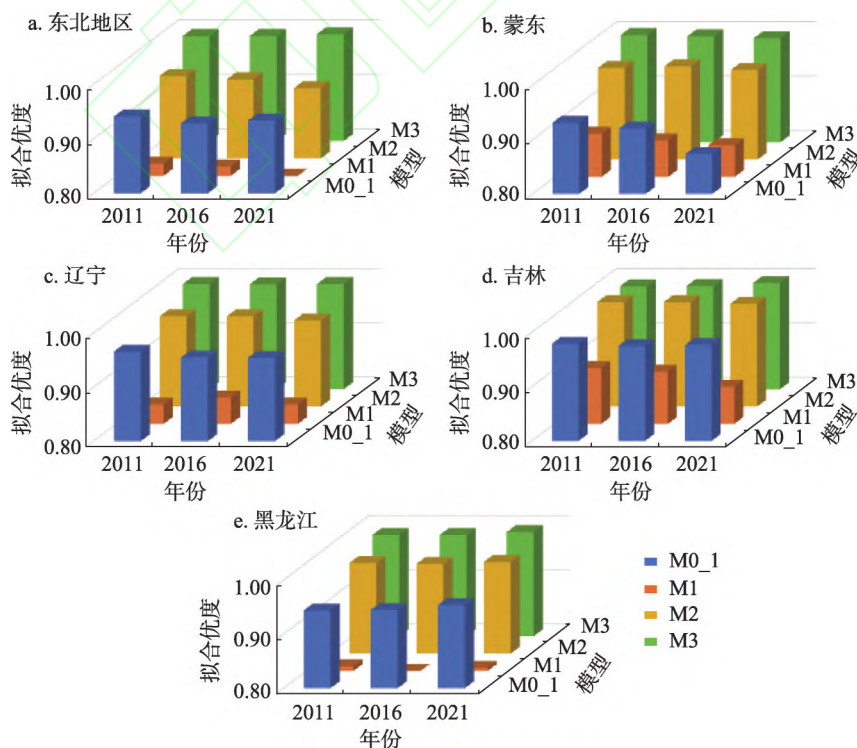


图3 模型拟合优度的异质性分析(人口视角)

Fig. 3 Heterogeneity analysis of model goodness of fit (population perspective)

表 7 用地视角下东北地区城镇聚落体系规模分布的回归结果

Tab. 7 The regression results of the size distribution of urban settlement system in Northeast China from the perspective of land use

区域	参数	2011				2016				2021			
		M0_1	M1	M2	M3	M0_1	M1	M2	M3	M0_1	M1	M2	M3
东北地区	斜率	-0.97	36.94	0.42	1256.63	-1.04	40.75	0.40	1407.40	-1.03	40.24	0.39	1415.83
	截距	7.03	2505.91	6.78	-199.34	7.35	3068.73	7.04	7.13	7.32	3078.99	7.05	-19.39
	R ²	0.96	0.84	0.93	0.99	0.96	0.81	0.93	1.00	0.95	0.83	0.93	1.00
蒙东	斜率	-0.90	25.81	0.59	119.43	-0.97	27.17	0.54	125.84	-1.06	24.53	0.48	113.45
	截距	4.70	110.26	4.57	75.07	4.86	130.49	4.75	93.26	4.91	142.65	4.86	109.34
	R ²	0.92	0.91	0.97	1.00	0.95	0.91	0.98	0.99	0.96	0.91	0.99	1.00
辽宁	斜率	-1.05	48.23	0.42	555.16	-1.14	60.45	0.41	682.25	-1.09	58.80	0.40	654.93
	截距	6.46	1011.43	6.38	384.12	6.82	1287.06	6.64	526.18	6.69	1214.80	6.61	496.26
	R ²	0.96	0.85	0.95	1.00	0.96	0.83	0.96	1.00	0.96	0.85	0.96	1.00
吉林	斜率	-0.96	27.59	0.33	275.91	-0.99	28.37	0.29	286.12	-1.02	31.35	0.30	326.76
	截距	5.63	598.41	6.08	329.53	5.77	732.33	6.31	449.93	5.94	801.12	6.38	468.54
	R ²	0.92	0.92	1.00	0.98	0.94	0.92	1.00	0.98	0.94	0.91	1.00	0.98
黑龙江	斜率	-1.19	34.82	0.39	398.87	-1.23	35.19	0.37	416.23	-1.20	32.67	0.34	403.42
	截距	6.39	813.24	6.18	359.71	6.53	911.38	6.32	425.98	6.45	942.55	6.39	458.12
	R ²	0.96	0.80	0.94	1.00	0.96	0.80	0.95	1.00	0.96	0.82	0.97	1.00

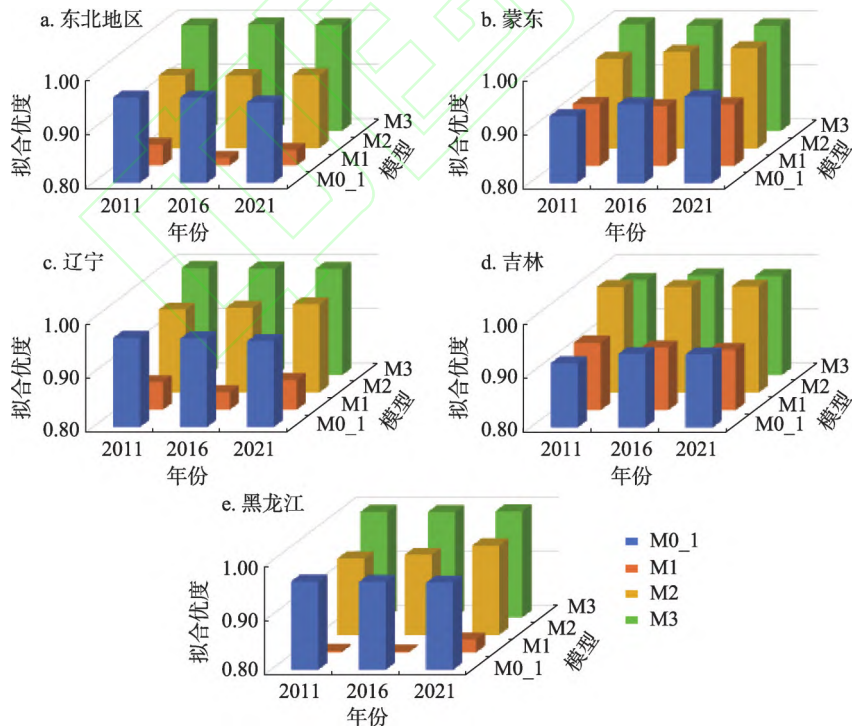


图 4 模型拟合优度的异质性分析(用地视角)

Fig. 4 Heterogeneity analysis of model goodness of fit (land use perspective)

要素规模分布存在显著失衡，人口极化程度显著高于用地极化程度，黑龙江省人口极化和用地极化程度均较高，吉林省人口分布和用地分布均接近理想“罗特卡—齐夫”分布；从演变过程来看，东北地区人口要素分布不断向区域中心城镇集聚，人口分布极化水平

不断提升,但区域中心城镇受到高质量发展目标约束而逐渐放缓“轻质量、重规模”土地城镇化进程,表现为用地规模分布的先极化后均衡。

4.4 面向乡村聚落体系的规模分布实证^②

由于乡村聚落人口数据难以获取,因此采用农村居民点用地规模分布来表征乡村聚落体系规模分布。整体上,5种模型拟合效果均较好, R^2 均在0.74以上,回归参数均通过 $p=0.1$ 的显著性检验,具有显著的统计学意义。其次,回归结果再次印证了“罗特卡—齐夫”模型在一定程度上可以应用于乡村聚落体系研究,与乡村位序—规模模型的回归系数高度相关, $Zipf$ 值对乡村聚落体系的集中分散特征具有显著的指示意义,但是整体拟合优度劣于乡村位序—规模模型。更值得关注的是,位序—累积规模模型也适用于乡村聚落体系研究,5种模型的拟合表现: $M2>M3>M0_2>M1>M0_1$,幂函数型位序—累积规模模型 R^2 高达0.99,可作为乡村聚落体系规模分布的一般模型。

聚焦于具体的乡村聚落体系规模分布,东北地区乡村聚落体系规模分布整体较为均衡,其 $Zipf$ 指数在0.82左右,变化幅度较小,虽大于中原地区乡村聚落体系的集聚水平^[13],但仍具有较大的极化空间。其次,乡村聚落体系规模分布和演变路径存在显著的空间异质性,极化程度由低到高表现为:吉林<蒙东<黑龙江<辽宁,演变过程具有辽吉相对稳定、蒙东分散化和黑省极化的特征。在区域总人口显著流失的背景下,东北地区的乡村空心化问题更为突出,乡村聚落体系有待进行优化重构,特别是土地要素与人口要素的协调,未来有待盘活存量乡村土地要素,促进农业农村规模化、集约化发展。

4.5 面向城乡聚落体系的规模分布实证

在分析城市聚落体系和乡村聚落体系规模分布模型适用性及分布特征的基础上,对二者融合的城乡聚落体系进行实证研究,鉴于城乡聚落体系的统一性,采用了城乡用地斑块数据来进行分析。整体上,5种模型拟合效果均较好, R^2 均在0.78以上,回归参数均通过 $p=0.1$ 的显著性检验,具有显著的统计学意义。其次,再次印证了“罗特卡—齐夫”模型在一定程度上可以应用于城乡聚落体系研究^[13, 37, 40], $Zipf$ 值对城乡聚落的集中分散具有显著的指示意义,但是整体拟合优度劣于其他模型。再次,乡村位序—规模模型在对城乡聚落体系研究中的表现优于“罗特卡—齐夫”模型。剖其原因,城市聚落由乡村聚落孕育产生,乡村聚落在城乡聚落体系中占绝大多数,进而深刻影响了一个城乡聚落体系的规模分布特征。更值得关注的是,位序—累积规模模型在城乡聚落体系研究中优势突出,5种模型的拟合表现: $M2>M3>M0_2>M1>M0_1$,幂函数型位序—累积规模模型的 R^2 接近1,可作为城乡聚落规模分布的一般模型。

聚焦于具体的城乡聚落体系规模分布,东北地区城乡聚落体系整体规模分布较为均衡,其 $Zipf$ 指数在0.87左右,略高于苏北地区的0.83,显著低于苏南地区的1.22^[37]。其次,城乡聚落体系整体规模分布格局与乡村聚落体系一致,极化程度由低到高:吉林<蒙东<黑龙江<辽宁。作为典型的收缩型区域,近年来东北地区城市聚落和乡村聚落均表现出明

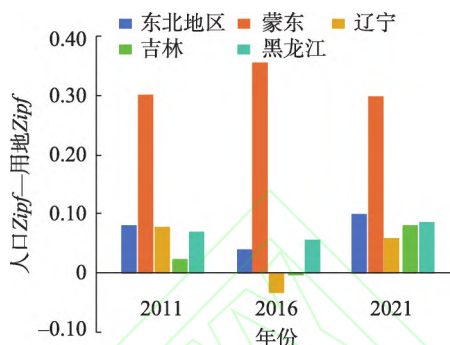


图5 东北地区城镇聚落体系人地要素规模分布的协调性分析

Fig. 5 Analysis of the coordination of the size distribution of human-land elements in the urban settlement system in Northeast China

② 由于篇幅原因,对乡村聚落体系和城乡聚落体系模型拟合优度的异质性分析不再展开,结合回归结果来看区域异质性、时间异质性并不明显。相关数据参见:<https://doi.org/10.57760/sciencedb.j00100.00015>。

显的收缩特征,以人口流失、经济增速放缓为典型特征^[49]。但从用地集约化来看,城乡聚落的集聚水平依然较低,与人口流失的宏观格局并不协调,亟待从用地视角开展收缩型区域空间治理,对重度收缩型城镇优化存量建设用地,对严重空心化乡村有序撤村并镇,科学开展乡村建设用地复耕复垦以更好提升粮食安全保障能力,实现区域精明收缩发展^[50]。

5 聚落规模分布的一般模型与未来应用

5.1 假说演绎与区域实证的对比启示

对比假说演绎与区域实证,位序—累积规模模型在数理推演和区域应用中均显示出了其科学性、适用性、稳健性和异质性。具体来看:①无论在何种聚落体系中,位序—累积规模模型均表现出强大的普适性,在城市聚落体系分析中优于“罗特卡—齐夫”模型,在乡村聚落体系分析中优于乡村一位序规模模型,其优势可总结为3点:拟合优度高(R^2 较大)、适用范围广(适用于城市聚落、乡村聚落、城乡聚落)、稳健性强(面对不同时间、不同区域没有显著异质性)。②模型适用性存在异质性,但异质性更多与Zipf取值有关,而区域异质性和时间异质性并不明显。从假说演绎实验来看,在假设聚落体系完全符合“罗特卡—齐夫”模型且 $0 < Zipf < 1$ 时,对数型位序—累积规模模型表现并不突出;但 $1 < Zipf < 2$ 时,对数型更优。从实证结果来看,东北地区城市聚落体系($Zipf > 1$)更符合对数型位序—累积规模模型,而乡村聚落和城乡聚落体系($Zipf < 1$)更符合幂函数型位序—累积规模模型。因此城乡聚落规模分布的一般模型必然具有分段函数特征,Zipf取值是其分段的重要依据。

5.2 一般模型的数学表达及其地理意义

基于以上理论与实证分析,可尝试总结出城乡聚落规模分布的一般模型(公式(3)):其中 $a > 0$ 、 $0 < b < 1$ 、 $c > 0$ 、 $d > 0$, S_i 为城乡聚落的累积规模, R_i 为城乡聚落的位序,实际上聚落位序就是到该位序的聚落数目。在 $0 < Zipf < 1$ 时,回归表达式为公式(4),在 $1 < Zipf < 2$ 时,回归表达式为原式。其地理内涵是随着聚落数目变化,城乡聚落累积规模也发生变化,这种变化具有截面特征,也具有时间序列特征,反映了城乡聚落体系规模分布的复杂时空特征。

首先,由于 $(1, P_1)$ 一定在 S_i 图像上,故参数 a 、 b 、 c 、 d 的拟合值与首位聚落有关。其次,公式(5)为位序—累积规模函数的导函数,显然 S_i 的一阶导数大于0,故随着聚落数目增长,城乡聚落累积规模也在增长;且在参数 a 、 b 、 c 、 d 确定的情况下, S_i 的一阶导数显然为位序 R_i 的单调递减函数,当 $0 < Zipf < 1$ 时, $abn^{b-1} \leq \frac{dS_i}{dR_i} \leq ab$,当 $1 < Zipf < 2$ 时, $\frac{c}{n} \leq \frac{dS_i}{dR_i} \leq c$, n 为聚落体系的聚落数目,故曲线变化速度与聚落数目有关,城乡聚落累积规模随着聚落数目增长的速度逐渐放缓。最后,曲线变化速度反映出了城乡聚落体系的规模分布特征,理论上变化速度越大,反映了聚落体系的规模差距越小,即越分散;变化速度越小,反映了聚落体系的规模差距越大,即越集聚(图6)。

$$S_i = \begin{cases} a \times (R_i)^b & (0 < zipf < 1) \\ c \times \ln R_i + d & (1 < zipf < 2) \end{cases} \quad (3)$$

$$\ln S_i = \ln a + b \ln R_i \quad (4)$$

$$\frac{dS_i}{dR_i} = \begin{cases} ab \times (R_i)^{b-1} & (0 < zipf < 1) \\ c \times (R_i)^{-1} & (1 < zipf < 2) \end{cases} \quad (5)$$

从静态来看,城镇聚落体系作为一种相对宏观的聚落分布体系,而乡村聚落体系作为一种相对微观的聚落分布体系,二者统一于位序—累积规模分布模型下,由此表明了城乡聚落体系规模分布具有一定自相似性。这种自相似性一方面表现为该区域的子区域的城乡聚落体系符合位序—累积规模分布,另一方面表现为城乡聚落体系中划分出的乡村聚落体系和城镇聚落体系均符合位序—累积规模分布。

从动态来看,城乡聚落体系的空间组织方式伴随自然变化与人类活动发生了显著重构。在农业时代以及工业化初期,城乡聚落体系更多表现为一种“垂直化”的中心地特征。随着深度工业化、全球化以及科技革命,人口、物资、信息、资金等要素流动更为便利,城乡聚落体系经历了从“中心地”向“城市网络”的演进过程,特别是城市聚落体系更容易融入区域、全国乃至世界等多尺度的城市网络体系中,大多数乡村聚落则较难融入网络体系而仍然具有较强的“中心地”特征,因此城乡聚落在新时期呈现出一种“中心地—网络”的空间组织形态^[18, 42, 51-52]。

“等级—规模”始终是城乡聚落体系空间组织的关键特征和发挥功能的规则约束,在中国语境下位序—累积规模方法具有鲜明的适用性。首先,区别于一般西方国家,中国城乡聚落具既有行政等级内涵以及政府对资源的配置特征,也有具有经济社会发展过程中的市场等级内涵以及市场对资源的配置特征,进而在“政府—市场”双重作用下具有复合的“等级—规模”结构,且这种“政治—经济”的双重“等级—规模”结构不仅存在于近现代中国,也存在于古代中国^[53-54]。其次,“等级—规模”结构是中心地和城市网络的共同特征和发挥功能的规则约束。对中心地体系来说,“等级—规模”是中心地的基本空间结构,理想状态下表现为正六边形结构,也是促进不同等级中心地垂直联系、维系体系稳定的规则约束。中心地自身的级别代表了等级,不同等级的中心地发挥不同类型的功能且拥有不同的辐射范围,中心地自身的人口、用地、经济总量等属性代表了其规模^[55]。对城市网络体系来说,网络节点的“等级—规模”是对网络结构和网络关系(功能)的映射,诸多网络节点具有差异化的网络地位^[56],在序列上必然呈现出等级特征,其网络节点地位主要由规模确定,包括两个方面:一是节点的自身属性,二是节点由于参与网络联系的关系总和(节点中心性)。因此,结合位序—累积规模方法相较于前述其他方法在拟合优度、适用范围以及稳健性方面优势显著,其对新时期中国具有“中心地—网络”空间组织形态的城乡聚落必然具有鲜明的适用性。

在前述逻辑下,位序—累积规模模型可对历史时期和现阶段城乡聚落体系的空间组织结构进行数学映射,其模型参数的变化揭示了城乡聚落空间重构的基本规律。其中模型参数 a 、 d 反映了城乡聚落体系中首位聚落的理想特征,通常为一定区域“中心地—网络”体系中承载巨量要素、发挥主导功能、具有极强辐射能力的区域中心聚落,首位聚落与理想值的偏离特征表明了首位聚落的“塌陷”或“臃肿”状态。其模型参数 b 、 c 直

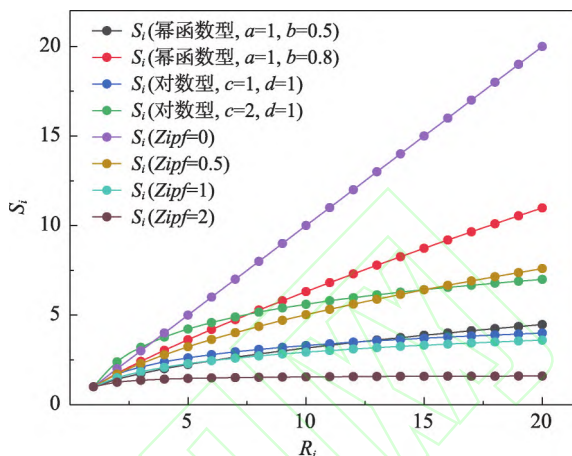


图6 位序—累积规模分布的一般模型的图像

Fig. 6 The image of the general model of rank-cumulative size distribution

接影响了聚落体系位序—累积规模曲线的增长速度，实质上反映了城乡聚落体系的集聚分散、规模差异特征。理论上 b 值与 c 值越大，相邻位序聚落规模差异越小，聚落体系愈发均衡。在位序—累积规模曲线趋近于直线 $y=ax$ （ a 即为模型中的参数）时， b 值趋近于1，齐夫指数 q 值趋近于0，此时聚落体系规模分布差异达到最小。在位序—累积规模曲线趋近于直线 $y=d$ （ d 即为模型中的参数）时， c 值接近于0，齐夫指数 q 值趋近于正无穷大，此时聚落体系规模分布差异达到最大。

5.3 聚落规模分布一般模型的未来应用

（1）面向乡村振兴的乡村聚落体系优化重构。改革开放40年的城镇化进程使得乡村地域的人口、资金、资源不断向城镇集聚，诱发了乡村地域的空心化、污损化，其在一定地域空间上表现为乡村聚落体系人口、土地、产业的失衡发展。特别是在乡村人口流失的宏观背景下，基于用地视角开展乡村聚落体系的格局优化是促进乡村有序振兴的重要空间治理方式^[57]。基于位序—累积规模模型（相比于乡村—位序规模模型）可有效分析乡村聚落体系的集聚或分散特征及未来演变趋势，分级分类引导不同区域不同位序乡村的发展方向，重点调控方向是促进乡村地域的集约化发展。对低城镇化率且尚有提升水平或重度收缩型区域，应严控增量和合理消减乡村聚落体系的累积规模，如西部地区 and 东北地区的乡村聚落；对于中等城镇化率或中度收缩型区域，应严控中低位序乡村聚落的规模，促进乡村聚落体系的进一步集聚化发展，如中原农区的乡村聚落；对高城镇化率或人口流入型区域，应在维持现有乡村聚落体系规模结构的基础上关注质量内涵的提升，如苏南地区的乡村聚落（图7）。

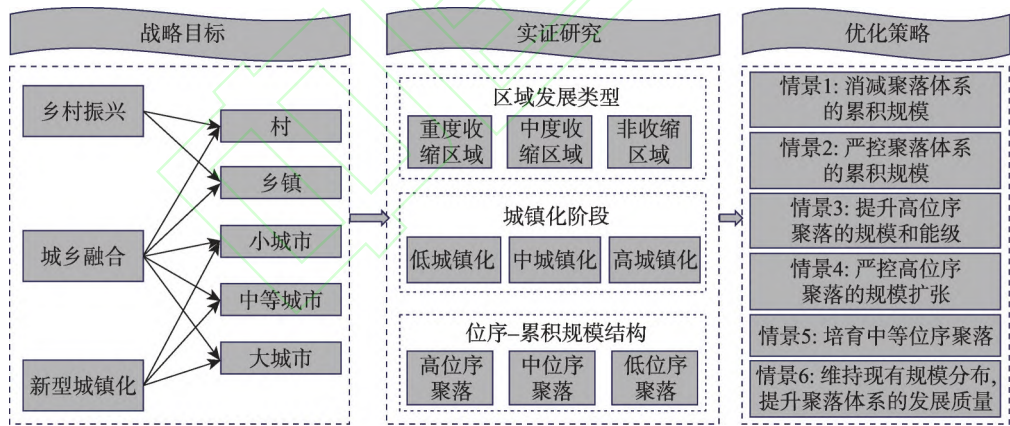


图7 面向国家战略的城乡聚落体系规模分布优化重构

Fig. 7 Optimization and reconstruction of size distribution of urban-rural settlement system oriented toward national strategy

（2）面向新型城镇化的大中小城镇协调发展。21世纪10年代，中国城镇化进入了新发展阶段，区别于改革开放初期的小城镇化（乡村城镇化）和20世纪90年代以来的大城镇化，“协调”是新型城镇化的重要内涵和发展理念，多层级、多中心、网络化是新型城镇化阶段城市地域系统规划建设指导原则。如何科学测度大中小城镇协调发展并提出优化策略，是城市地理学需直面的基础理论问题和重要实践需求^[58]。基于位序—累积规模模型，可识别都市圈、城市群等多种城镇聚落体系的协调发展状态，分析不同位序城镇在整个聚落体系中的特征与地位，进而对不同城镇聚落体系及其内部的不同位序城市提出优化策略。首先，考虑城镇聚落体系的发展阶段，对低城镇化率阶段的，应关注集聚化的“单核”发展策略，对高城镇化率阶段的，应关注区域城镇的一体化发展；其次，

考虑城镇聚落体系的内部特征, 其位序—累积规模曲线往往呈现出“偏离”特征, 对超出曲线城市, 应抑制其规模继续扩大, 对低于曲线城市, 应进一步壮大其发展规模。

(3) 面向城乡融合的城乡聚落体系优化重构。城乡融合是新时代城乡关系的基本遵循, 面向城乡融合的城乡聚落体系优化重构成为其重要的空间实施手段, 也是城市地理学与乡村地理学融合发展的重要理论问题和重大社会实践需求。城市地域与乡村地域特征虽在一定程度上泾渭分明, 但城市地域从广大乡村地域中孕育而生, 城镇聚落体系在一定程度上具有乡村聚落特征, 二者相互作用、联系紧密、不可分割。进一步而言, 城乡融合也成为空间治理重要理念创新, 单纯的乡村聚落体系优化或者大中小城镇协调优化并不能完美解决区域发展的现实问题, 区域病在城市和乡村均有其表现, 因此开展城乡聚落体系的优化重构更有利于区域全局发展^[5]。

6 结论与讨论

6.1 结论

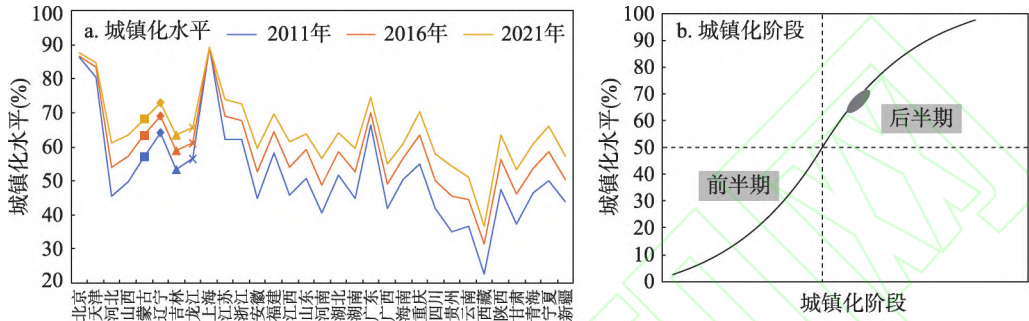
本文立足于聚落规模分布的理论问题与面向国家战略的聚落体系格局优化实践, 回顾了聚落规模分布模型的研究进展并尝试探究城乡聚落规模分布的一般规律模型, 研究发现: ① 相较于传统的规模分布模型, 位序—累积规模模型被城市地理学者发现并逐步应用于城乡聚落体系研究中且表现良好, 但有待进一步科学化、理论化与应用拓展。② 基于理论分析与数理推导, 可归纳出3种潜在高度适配城乡聚落的位序—累积规模模型: 线性模型, 幂函数型, 对数型。③ 结合假说—演绎实验来看, 3种模型拟合程度良好结果稳健, 无论对不同类型的聚落体系还是不同的 $Zipf$ 值。同时假说—演绎实验结果也表现出一定的异质性, 即模型拟合优度和最佳模型随 $Zipf$ 取值区间变化而变化。④ 位序—累积规模模型对表征东北地区聚落体系规模集中与分散特征效果良好。在城镇聚落体系研究中, 位序—累积规模模型优于“罗特卡—齐夫”模型; 在乡村聚落体系研究中, 位序—累积规模模型优于乡村位序—规模模型, “罗特卡—齐夫”模型虽然一定程度上适用于乡村聚落但效果最差; 在整个城乡聚落体系研究中, 位序—累积规模模型优于上述2种模型。同时值得注意的是, 位序—累积规模模型在有效性方面并无明显的时间、区域异质性。⑤ 假说演绎与区域实证的结论高度一致, 位序—累积规模模型适合作为城乡聚落体系的一般模型, 其可依据 $Zipf$ 取值不同表达为幂函数型和对数函数型的分段函数, 其地理内涵是随着聚落数目变化而城乡聚落累积规模也发生变化, 首位聚落、聚落数目、聚落规模分布特征共同影响了曲线的变化。⑥ 面向乡村振兴的乡村聚落体系优化重构、面向新型城镇化的大中小城镇协调发展以及面向城乡融合的城乡聚落体系优化重构, 位序—累积规模模型都有很大应用潜力和特色优势, 应在考虑区域发展背景、所处城镇化阶段以及规模分布特征的基础上开展优化重构。

6.2 讨论

6.2.1 对东北地区城乡聚落空间组织的新认知与新思考

(1) 中国城镇化后半程城乡聚落空间组织的极化进程放缓。城镇化与区域收缩深刻影响了城乡之间、区域之间人口流动方向、速度和规模, 进而重塑了区域城乡聚落的空间组织形态。城镇化对城乡聚落空间组织的塑造具有显著的阶段性特征。在城镇化前半程, 乡村人口以较快速度向城市大量集聚, 特别在深度市场化、全球化背景下“异地城镇化”特征突出, 乡村不断空心化、老龄化, 中小城市相对大城市发展相对缓慢, 区域极化特征不断加剧^[5]。进入城镇化后半程, 由于城市规模增量放缓和“内涵式发展”目标

要求,城镇化速度逐渐放缓(图8),区域极化趋势也在一定程度上得到缓解并趋于稳态。从2010年中国城镇化进入后半程的发展现实来看,城市与乡村之间的高强度极化过程得到了初步的缓解^[59]。而由于东北地区城镇化进程相对较早,因此东北地区相对于全国较多数地区要更早进入城镇化后半程。



注:数据来源于国家统计局官网公布的历年《中国统计年鉴》。

图8 2011—2021东北地区城镇化进程的阶段分析

Fig. 8 Stage analysis of urbanization process in Northeast China from 2011 to 2021

(2) 东北地区作为典型收缩区域城乡聚落空间组织的“再极化”特征。同时考虑区域经济社会发展的宏观状态,伴随前10年东北振兴战略尚未解决区域发展的机制性、机制性问题以及21世纪10年代中国宏观经济进入“新常态”,东北地区成为中国城镇化后半程典型的收缩型区域,从“六普”到“七普”人口流失约1100万人,主要表现为乡村、镇、县和中小城市的普遍性人口收缩^[47, 49]。区域收缩使得城镇化后半程中本地城市对人口的集聚效应大打折扣,城市地区的存量人口和来自乡村的少量增量人口也被其他区域“剥夺”,数据显示2011—2021年东北地区城市城区人口下降4.01%,为全国罕见。作为收缩型区域,由于绝大部分城市的规模“塌陷”、城镇化后半程的发展动力不足,区域城乡聚落的空间组织实现了一种自然“极化”过程,即区域中除中心城市外普遍性收缩所带来的低密度极化。从实证结果来看,东北地区城市聚落体系的Zipf指数在2016—2021年增长明显,此阶段相较于2011—2016年的区域收缩特征也更为突出。但从景观地域来看,城乡建设用地极化特征则大为放缓,由此暴露出人口规模分布与用地的显著脱钩状态,特别表现为大部分收缩城市与乡村亟待调整的粗放低效的土地利用现状。以典型收缩城市鹤岗市为例,2016—2021年间人口流失6.29万人,但建设用地面积增长9.79 km²。

(3) 区域收缩与城乡聚落空间组织理论上存在复杂的相互作用关系。一方面,城镇化原本是驱动城乡人口流动和要素空间配置的直接动力,伴随城镇化的加速阶段与减速阶段以及乡村振兴和城乡融合战略的实施,城乡聚落空间组织的极化过程会呈现出一种先加速、后减速特征。但区域收缩对城镇化推动乡村人口向城市的集聚过程产生强烈干预作用,成为城乡聚落空间组织的新语境和新动力,进而影响城乡聚落空间组织形态的原本演进路径(图9)。另一方面,已被干预的城乡聚落空间组织形态,在城乡地域系统发展中具有经济、社会、生态等多方面的空间效应,必然在一定程度上反馈到区域的收缩进程。但是否加剧或者延缓区域的收缩,是否存在一种绝对或相对收敛状态,对收缩型区域聚落空间组织优化有何政策启示,鲜有具体的实证研究,未来依然有待进一步探索。

(4) 东北地区城乡聚落空间组织总体优化策略思考。结合图7综合考虑区域发展状态、城镇化阶段以及位序—累积规模特征对东北地区城乡聚落空间组织提出总体优化策略(图10)。① 重点调控区域是吉林省、蒙东地区以及黑龙江省,一般调控区域为辽宁

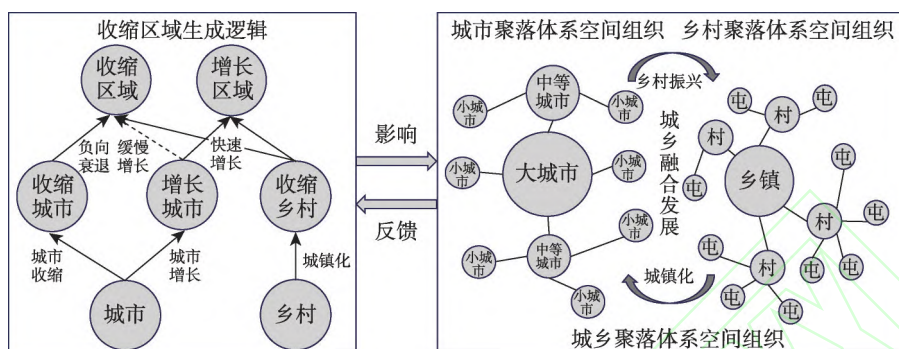


图9 区域收缩与聚落空间组织关系的理论认知

Fig. 9 A theoretical cognition of the relationship between regional shrinkage and settlement spatial organization

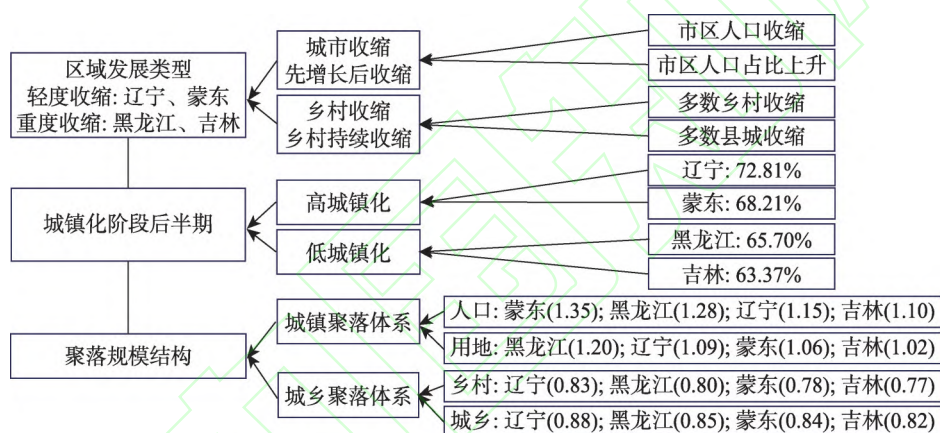


图10 东北地区城乡聚落空间组织的特征总结

Fig. 10 Summary of the characteristics of the spatial organization of urban and rural settlements in Northeast China

省。② 吉林省：当前城乡聚落的用地集约化水平较低，特别是乡村建设用地，亟待盘活闲置的乡村建设用地，未来可通过用地占补平衡的省内调剂来促进长春都市圈核心城市发展，以及通过对闲置建设用地的科学复耕复垦，创造高质量耕地增量，提高对国家粮食安全的保障能力。③ 蒙东地区：提高建设用地要素与人口分布的空间匹配性，重点保障赤峰、通辽、乌兰浩特、海拉尔、满洲里等核心城市的建设用地供给，严控其他城市建设用地增量；进一步提高乡村聚落的集聚水平，宜耕则耕宜牧则牧，利用蒙东地区独特资源优势发展好现代化“大牧业”。④ 黑龙江省：通过城乡聚落规模结构调整统筹推进粮食生产与新型城镇化。一方面可对标国外大农场，通过提升其乡村聚落集聚水平实现规模化生产，为农业机械化、智慧农业设施等现代化农业设施应用创造条件，强化国家粮食安全压舱石地位和推动区域实现农业现代化；另一方面，全面推进哈长城市群建设取得新进展，引导区域剩余农业人口继续向哈尔滨、长春等核心城市转移，提升哈长城市群在中国城市群中的地位。⑤ 辽宁省：在城乡聚落空间组织方面对标苏南地区，强化辽中南城市群的“沈阳—大连”的双核心结构，避免其走向分化，沈阳作为内陆型聚落体系的核心，发挥面向辽宁省、东北地区乃至整个东北亚区域的枢纽带动作用，大连作为港口型聚落体系的核心，发挥辽宁省和整个东北地区的区域门户作用；在乡村聚落空间组织方面应聚焦其产业分工，引导乡村产业向绿色化、高值化转型，与吉黑两省的规模化农业有所区分。

6.2.2 研究意义、展望与不足

(1) 研究意义与特色梳理。总结来看, 本文的文献意义在于: 统筹城市聚落与乡村聚落, 立足于经典聚落规模分布理论与方法模型, 融合“城市地理—乡村地理—区域地理”既往研究来探究城乡地域系统规模结构的一般模型表达及其地理意义, 以期从方法模型和区域实证层面为建立城乡地域系统统一规模分布理论提供方法支撑与经验性证据, 并期望在大人文地理学科中推动城市地理学者与乡村地理学者的深度交叉融合研究。本文的现实意义在于: 提供城乡聚落要素空间组织的地理计量工具, 以聚落规模分布调控为政策实践抓手, 合理配置各类资源要素, 为大中小城市协调发展的新型城镇化、科学分类有序推进的乡村振兴以及统筹城乡地域的城乡融合发展提供决策依据。区别于传统的聚落规模分布研究, 研究特色主要体现在以下方面: ① 在研究逻辑上, 本文遵循了“假说演绎—区域实证—理论总结”的基本思路, 其中创新模型提出具有数理支撑而不仅停留于经验主义层面, 假说演绎与区域实证的相互印证进而得到聚落规模分布一般规律模型的分段函数表达, 逻辑的严密性保证了研究结果的科学性。② 在对象选择上, 本文并未就城市论城市、就乡村论乡村, 而是分别考虑了城市聚落体系、乡村聚落体系以及城乡融合背景下的城乡聚落体系, 假说演绎与区域实证的研究对象完全对应, 创新模型相较于既有模型在假说演绎与区域实证中针对多种聚落类型表现出了较强稳健性, 由此使得模型的普适性和可拓展性大大增强。③ 不局限于模型的数学解析, 对新模型的地理意义进行了初步诠释, 既总结了模型所展现出的聚落规模分布相似性以及对新时期具有“中心地—网络”特征的城乡聚落体系的适用性, 也提出了类似于“罗特卡—齐夫”模型斜率与截距的关键参数 a 、 b 、 c 、 d 。

(2) 假说—演绎法是本文重要的方法论支撑, 其基础是对数学工具的选择, 尔后把选择的数学工具作为潜力模型纳入假说—演绎的框架, 依据地理学知识构建三大典型的聚落体系簇, 进行控制变量法对照实验。在对实验结果进行系统解析时, 既关注其全局与局部数学解析, 包括模型的总体适用性和在不同对照组的异质性, 又关注其实际地理背景, 即 $Zipf$ 值的设定范围。所得结果与前人结论相似并进行了系统数学推导^[18, 41], 同时也进一步证明了位序—累积规模模型存在一定的分段函数特征; 以东北地区为例的实证分析结果与假设演绎实验高度一致, 再次印证了演绎实验的可靠性, 以及地理学理论科学化的关键不仅仅是基于经验主义的归纳, 也存在其可演绎特征。

(3) 位序—累积规模模型的未来拓展方向。面向国家战略的聚落体系优化重构是人文地理学服务经济社会发展的重要实践路径。自“罗特卡—齐夫”模型引入中国以来, 中国城市地理学界据此开展了诸多验证研究, 相关研究对中国城镇规模结构也起到了一定的决策咨询作用。位序—累积规模模型在城乡聚落体系规模分布研究的有效性在本文中已得到了进一步证实, 可尝试作为城乡聚落体系规模分布的一般模型。从理论深化研究来看, 如何进一步解释位序—累积规模模型的地理内涵, 一方面, 不同聚落体系的累积规模变化速度为何会产生差异, 其与首位聚落、聚落数目以及聚落规模结构存在怎样的精确关系; 另一方面, 在新时期“中心地—网络”的城乡聚落空间组织新特征下, 如何更加科学界定聚落规模内涵, 不仅需要考虑人口、土地、经济多维度要素, 更要考虑中心地和城市网络的多种组织方式。从应用指导来看, 是否存在类似理想齐夫法则 q 值的 a 值、 b 值、 c 值以及 d 值或者其约束关系, 不同的函数参数值与整个聚落体系的经济绩效、社会公平、绿色发展是否存在一定内在关联, 由此可尝试为城乡聚落体系的优化重构提供新的决策思路。

(4) 诚然,本文也存在以下研究局限,未来有待继续深化完善:在研究区域选择上,本文以中国东北地区为例,虽具有典型性,但相对普适性的城乡聚落规模分布模型在迁移至中国和世界其他区域时,面临区域间客观存在的自然地理条件和社会经济发展差异性的挑战。一方面,自然地理条件是聚落形成和发展的重要地理基础,山川、河流、谷地等自然阻隔深刻影响了聚落空间分布特征^[53, 60],东北地区属于平原型聚落体系,未来依然有待通过与丘陵、高原等多种聚落体系类型开展对比研究。另一方面,中国具有多类型的城市化地域和模式,例如“苏南模式”“温州模式”“珠三角模式”等,东北地区属于典型计划经济体制下自上而下的城镇化模式^[61-62]。未来基于多种自然与人文类型区域的对比研究,可进一步完善扩展本文模型的假设条件和适用范围。在研究数据选择上,本文主要基于多年统计年鉴数据和土地利用数据,伴随着城乡融合治理体系的不断完善、基本公共服务均等化的推进以及乡村数字化进程,城乡一体化的数据体系正在逐渐形成^[63],未来基于城乡融合数据进行实证研究,有利于更加准确科学把握城乡聚落体系的“人口—土地—产业”规模分布特征与发展现实瓶颈,进而提出针对性的优化重构策略。此外,在城市阈值标准方面,国内外学界并未达成统一共识,本文综合国内、国外学者研究与政府决策采用了10万人口作为城市阈值标准,既可涵盖中国绝大部分设市城市和发展较好的建制镇,又可对接国外城乡聚落体系研究,但模型的有效性和稳健性仍有待在更多区域实证的基础上进一步验证。

关联数据信息: 本文关联实体数据集已被ScienceDB(Science Data Bank)科学数据银行收录,获取地址:
<https://doi.org/10.57760/sciencedb.j00100.00015>.

参考文献(References)

- [1] Zhao Rong, Wang Enyong, Zhang Xiaolin, et al. Human Geography. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2006. [赵荣, 王恩涌, 张小林, 等. 人文地理学. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2006.]
- [2] Xu Xueqiang, Zhou Yixing, Ning Yuemin. Urban Geography. 3rd ed. Beijing: Higher Education Press, 2022. [许学强, 周一星, 宁越敏. 城市地理学. 3版. 北京: 高等教育出版社, 2022.]
- [3] Jin Qiming. Rural Settlement Geography. Beijing: Science Press, 1988. [金其铭. 农村聚落地理. 北京: 科学出版社, 1988.]
- [4] Liu Yansui, Long Hualou, Li Yurui. Human geography research based on the new thinking of global rural-urban relationship. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(12): 2869-2884. [刘彦随, 龙花楼, 李裕瑞. 全球城乡关系新认知与人文地理学研究. 地理学报, 2021, 76(12): 2869-2884.]
- [5] Fang Chuanglin. Theoretical analysis on the mechanism and evolution law of urban-rural integration development. Acta Geographica Sinica, 2022, 77(4): 759-776. [方创琳. 城乡融合发展机理与演进规律的理论解析. 地理学报, 2022, 77(4): 759-776.]
- [6] Liu Yansui. Research on the urban-rural integration and rural revitalization in the new era in China. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(4): 637-650. [刘彦随. 中国新时代城乡融合与乡村振兴. 地理学报, 2018, 73(4): 637-650.]
- [7] Song Changqing, Cheng Changxiu, Shi Peijun. Geography complexity: New connotations of geography in the new era. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(7): 1204-1213. [宋长青, 程昌秀, 史培军. 新时代地理复杂性的内涵. 地理学报, 2018, 73(7): 1204-1213.]
- [8] Sun Bindong, Wei Xuhong. Polycentric Spatial Structure and Development Strategy of Urban Areas in China. Beijing: Science Press, 2016. [孙斌栋, 魏旭红. 中国城市区域的多中心空间结构与发展战略. 北京: 科学出版社. 2016.]
- [9] Liu Yansui, Zhou Yang, Li Yuheng. Rural regional system and rural revitalization strategy in China. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(12): 2511-2528. [刘彦随, 周扬, 李玉恒. 中国乡村地域系统与乡村振兴战略. 地理学报, 2019, 74(12): 2511-2528.]
- [10] Liu Y S, Li Y H. Revitalize the world's countryside. Nature, 2017, 548(7667): 275-277.
- [11] Wang Zhe, Zheng Fachuan. Rank-size distribution of the modern China urban system based on the China Postal Atlas in 1936. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(8): 1910-1923. [王哲, 郑法川. 中国近代城市体系的位序规模特征: 基于1936年《中华民国邮政舆图》的分析. 地理学报, 2021, 76(8): 1910-1923.]

- [12] Sun Bindong, Wang Yanyan, Zhang Zhiqiang, et al. The form and evolution of city size distribution and urban growth model in China: An analysis based on Zipf's Law and Gibrat's Law. *Progress in Geography*, 2022, 41(3): 361-370. [孙斌栋, 王言言, 张志强, 等. 中国城市规模分布的形态和演化与城市增长模式: 基于Zipf定律与Gibrat定律的分析. *地理科学进展*, 2022, 41(3): 361-370.]
- [13] Wei Chunjiang, Zhu Jiguang, Li Xiaojian, et al. A rethink of the rank-size rule for rural settlement in traditional agricultural areas: A case study of Zhoukou city. *Economic Geography*, 2017, 37(3): 158-165. [卫春江, 朱纪广, 李小建, 等. 传统农区村落位序—规模法则的实证研究: 以周口市为例. *经济地理*, 2017, 37(3): 158-165.]
- [14] Sonis M, Grossman D. Rank-size rule for rural settlements. *Socio-Economic Planning Sciences*, 1984, 18(6): 373-380.
- [15] Grossman D, Sonis M. A reinterpretation of the rank-size rule: Examples from England and the land of Israel. *Geography Research Forum*, 2016(9): 67-108.
- [16] Tong Baoquan, Bao Yulong, Yang Bingbing, et al. The evolvement characteristics and mechanism of settlement system in Xilingol pastoral area. *Geographical Science*, 2018, 38(3): 410-418. [佟宝全, 包玉龙, 杨兵兵, 等. 锡林郭勒牧区聚落体系演化特征及其机制. *地理科学*, 2018, 38(3): 410-418.]
- [17] Zhang Yikun, Wang Yongsheng. Measurement methods and spatio-temporal characteristics of urban-rural factor flow in China. *Acta Geographica Sinica*, 2023, 78(8): 1888-1903. [张溢堃, 王永生. 中国省域城乡要素流动测度方法与时空特征. *地理学报*, 2023, 78(8): 1888-1903.]
- [18] Huang Wanzhuang, Shi Peiji. An empirical study on rank cumulative size model of rural settlements in the Hehuang area. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(6): 1489-1503. [黄万状, 石培基. 河湟地区乡村聚落位序累积规模模型的实证研究. *地理学报*, 2021, 76(6): 1489-1503.]
- [19] Jefferson M. The law of the primate city. *Geographical Review*, 1939, 29(2): 226-232.
- [20] Sun Bindong, Zhang Zhifan, Li Wan. Characteristics and impact of population spatial structure on economic performance in China based on spatial identification of physical cities. *Geographical Science*, 2021, 41(11): 1884-1896. [孙斌栋, 张之帆, 李皖. 中国省域人口空间结构特征及其对经济绩效的影响: 基于实体城市的空间识别. *地理科学*, 2021, 41(11): 1884-1896.]
- [21] Davis K. World urbanization 1950-1970//Bourne L S, Simmons J W. *Systems of cities*. New York: Oxford University Press, 1978.
- [22] Carroll G R. National city-size distributions. *Progress in Human Geography*, 1982, 6(1): 1-4.
- [23] Singer H W. The "courbe des populations": A parallel to Pareto's law. *The Economic Journal*, 1936, 46: 254-263.
- [24] Zipf G K. *Human Behavior and the Principle of Least Effort: An Introduction to Human Ecology*. Cambridge Mass: Addison-Wesley, 1949.
- [25] Gu Chaolin. Hierarchical size distribution model and structural prediction of urban system in China. *Economic Geography*, 1990, 10(3): 54-56. [顾朝林. 中国城镇体系等级规模分布模型及其结构预测. *经济地理*, 1990, 10(3): 54-56.]
- [26] Xu Xueqiang. Development and control of population size in provincial capital cities. *City Planning Review*, 1982(4): 41-45. [许学强. 省会城市人口规模的发展与控制. *城市规划*, 1982(4): 41-45.]
- [27] Zhang Xinwei, Ning Yuemin. The definition and development of metropolitan areas in China based on the data from the 6th national census. *Geographical Science*, 2015, 35(6): 665-673. [张欣炜, 宁越敏. 中国大都市区的界定和发展研究: 基于第六次人口普查数据的研究. *地理科学*, 2015, 35(6): 665-673.]
- [28] Zhang Keyun, Zhang Jiang. Polycentricity and green development efficiency of urban agglomerations: Spatial distribution of urbanization based on heterogeneity. *China Population, Resources and Environment*, 2022, 32(2): 107-117. [张可云, 张江. 城市群多中心性与绿色发展效率: 基于异质性的城镇化空间布局分析. *中国人口·资源与环境*, 2022, 32(2): 107-117.]
- [29] Ding Zhiwei, Ma Fangfang, Zhang Gaisu. Spatial differences and influencing factors of urban network attention by Douyin fans in China. *Geographical Research*, 2022, 41(9): 2548-2567. [丁志伟, 马芳芳, 张改素. 基于抖音粉丝量的中国城市网络关注度空间差异及其影响因素. *地理研究*, 2022, 41(9): 2548-2567.]
- [30] Zhou Yixing, Yang Qi. A review on the urban-size hierarchy of China and the territorial types of the hierarchy on provincial level. *Acta Geographica Sinica*, 1986, 41(2): 97-111. [周一星, 杨齐. 我国城镇等级体系变动的回顾及其省区地域类型. *地理学报*, 1986, 41(2): 97-111.]
- [31] Yang Z P, Wang S J, Hao F L, et al. Spatial distribution of different types of villages for the rural revitalization strategy and their influencing factors: A case of Jilin province, China. *Chinese Geographical Science*, 2023, 33(5): 880-897.
- [32] Fang Yangang, Liu Jisheng. Diversified agriculture and rural development in China based on multifunction theory: Beyond modernization paradigm. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(2): 257-270. [房艳刚, 刘继生. 基于多功能理论的

- 中国乡村发展多元化探讨: 超越“现代化”发展范式. 地理学报, 2015, 70(2): 257-270.]
- [33] Fang Yangang, Liu Jianzhi. Coupled modes of grain yield and agricultural labor changes and rural development types at county level in northeast China. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(10): 2241-2255. [房艳刚, 刘建志. 东北地区县域粮劳变化耦合模式与乡村发展类型. 地理学报, 2020, 75(10): 2241-2255.]
- [34] Long Hualou, Tu Shuangshuang. Rural restructuring: Theory, approach and research prospect. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(4): 563-576. [龙花楼, 屠爽爽. 论乡村重构. 地理学报, 2017, 72(4): 563-576.]
- [35] Yang Ren. The actor-network perspective on the reconstruction process and internal mechanism of typical Taobao villages in the Pearl River Delta region. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(12): 3076-3089. [杨忍. 珠三角地区典型淘宝村重构过程及其内在逻辑机制. 地理学报, 2021, 76(12): 3076-3089.]
- [36] Cheng Mingyang, Liu Yansui, Jiang Ning. Study on the spatial pattern and mechanism of rural population-land-industry coordinating development in Huang-Huai-Hai area. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(8): 1576-1589. [程明洋, 刘彦随, 蒋宁. 黄淮海地区乡村人—地—业协调发展格局与机制. 地理学报, 2019, 74(8): 1576-1589.]
- [37] Li Zhi, Zhang Xiaolin, Li Hongbo, et al. Evolution paths and the driving mechanism of the urban-rural scale system at the county level: Taking three counties of Jiangsu province as an example. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(12): 2392-2408. [李智, 张小林, 李红波, 等. 江苏典型县域城乡聚落规模体系的演化路径及驱动机制. 地理学报, 2018, 73(12): 2392-2408.]
- [38] Zhu Jiguang, Li Xiaojian, Wang De, et al. Spatial structure evolution and its mechanism of urban-rural settlement in traditional rural areas: A case study of Zhoukou city, Henan province. *Human Geography*, 2019, 34(4): 126-134. [朱纪广, 李小建, 王德, 等. 传统农区城乡体系空间结构演变及其形成机制研究: 以河南省周口市为例. 人文地理, 2019, 34(4): 126-134.]
- [39] Hou Zhihua, Liu Min, Fan Xiaoxia, et al. Development potential and spatial pattern of urban-rural settlement system in the Fenhe River Basin. *Geographical Science*, 2020, 40(12): 1978-1989. [侯志华, 刘敏, 樊晓霞, 等. 汾河流域城乡聚落体系发展潜能测度及空间模式探究. 地理科学, 2020, 40(12): 1978-1989.]
- [40] Ma Chen, Wang Hongwei, Tan Bo, et al. Characteristics and spatial reconstruction of an urban-rural settlement scale system in a typical oasis in Xinjiang: A case study of the Ugan-Kuqa River Delta Oasis. *Acta Geographica Sinica*, 2022, 77(4): 852-868. [马晨, 王宏卫, 谈波, 等. 新疆典型绿洲城乡聚落规模体系特征及空间重构: 以渭干河—库车河三角洲绿洲为例. 地理学报, 2022, 77(4): 852-868.]
- [41] Ye Hao, Zhuang Dachang. A new method for analyzing the size structure of urban system: Rank cumulative size model. *Geographical Science*, 2017, 37(6): 825-832. [叶浩, 庄大昌. 城市体系规模结构研究的新方法: 位序累积规模模型. 地理科学, 2017, 37(6): 825-832.]
- [42] Yang Ren, Deng Yingxian. The evolution and optimized reconstructing analysis of rural settlement system in Guangdong province. *Acta Geographica Sinica*, 2024, 79(2): 281-298. [杨忍, 邓颖贤. 广东省村镇聚落体系演化及其优化重组. 地理学报, 2024, 79(2): 281-298.]
- [43] Xu Jianhua. *Mathematical Methods in Modern Geography*. 3rd ed. Beijing: Higher Education Press, 2017. [徐建华. 现代地理学中的数学方法. 3版. 北京: 高等教育出版社, 2017.]
- [44] Henderson J V, Wang H G. Urbanization and city growth: The role of institutions. *Regional Science and Urban Economics*, 2007, 37(3): 283-313.
- [45] Rosen K T, Resnick M. The size distribution of cities: An examination of the Pareto law and primacy. *Journal of Urban Economics*, 1980, 8(2): 165-186.
- [46] Wan Qing, Wu Chuanqing, Luo Xiang, et al. Spatial and temporal evolution characteristics of China's city size distribution. *Economic Geography*, 2018, 38(4): 81-90. [万庆, 吴传清, 罗翔, 等. 中国城市规模分布时空演化特征: 基于“五普”和“六普”人口统计数据的实证研究. 经济地理, 2018, 38(4): 81-90.]
- [47] Wang Shijun, Gu Meng, Chang Xiaodong. The deconstruction of policy system and response of regional economy of northeast revitalization. *Acta Geographica Sinica*, 2022, 77(10): 2547-2565. [王士君, 顾萌, 常晓东. 东北振兴政策体系解构及区域经济响应研究. 地理学报, 2022, 77(10): 2547-2565.]
- [48] Wang Xuewei, Wang Shijun, Fan Dalong. *Spatial Reconstruction of Urban Agglomeration Groups in Northeast China: Pattern, Process and Effect*. Beijing: Science Press, 2018. [王雪微, 王士君, 范大龙. 东北地区城市群组空间重构: 格局·过程·效应. 北京: 科学出版社, 2018.]
- [49] Sun Pingjun, Zhang Keqiu, Cao Naigang, et al. Geographical cognition and governance logic of regional urban shrinkage in Northeast China. *Acta Geographica Sinica*, 2024, 79(8): 1918-1939. [孙平军, 张可秋, 曹乃刚, 等. 东北区域性城市收缩的地理认知与治理逻辑. 地理学报, 2024, 79(8): 1918-1939.]
- [50] Li Wancong, Li Hong, Wang Shijun, et al. Identification of shrinking cities in Northeast China and spatiotemporal

- evolution of construction land expansion. *Resources Science*, 2024, 46(2): 368-385. [李宛聪, 李红, 王士君, 等. 东北地区收缩城市识别及其建设用地扩张时空演变. *资源科学*, 2024, 46(2): 368-385.]
- [51] Hao Feilong, Wu Xiaoran, Guan Haoming, et al. "Hierarchy-network" structure of cities in Northeast China based on Baidu migration data. *Geographical Science*, 2023, 43(2): 251-261. [浩飞龙, 吴潇然, 关皓明, 等. 基于百度迁徙数据的东北地区城市“层级—网络”结构. *地理科学*, 2023, 43(2): 251-261.]
- [52] Wang Shijun, Lian Chao, Zhao Ziyu. From central place to city network: A theoretical change in China's urban system study. *Geographical Research*, 2019, 38(1): 64-74. [王士君, 廉超, 赵梓渝. 从中心地到城市网络: 中国城镇体系研究的理论转变. *地理研究*, 2019, 38(1): 64-74.]
- [53] Han Maoli. *Fifteen Lectures on Chinese Historical Geography*. Beijing: Peking University Press, 2015. [韩茂莉. *中国历史地理十五讲*. 北京: 北京大学出版社, 2015.]
- [54] G. William Skinner. *Cities in Late Imperial China*. Ye Guangting, Xu Zili, Wang Sijun, et al., trans. Beijing: Zhonghua Book Company, 2000. [G. William Skinner. *中华帝国晚期城市*. 叶光庭, 徐自立, 王嗣均, 等, 译. 北京: 中华书局, 2000.]
- [55] Liang Jinshe. A reexamination of the market principle in central place theory. *Acta Geographica Sinica*, 2022, 77(8): 1892-1906. [梁进社. 中心地理论中市场原则的再讨论. *地理学报*, 2022, 77(8): 1892-1906.]
- [56] Sheng Kerong, Li Xiaorui, Sun Wei, et al. Examining the impacts of network position on urban carbon emissions efficiency in China. *Acta Geographica Sinica*, 2023, 78(11): 2864-2882. [盛科荣, 李晓瑞, 孙威, 等. 中国城市网络地位对碳排放效率的影响. *地理学报*, 2023, 78(11): 2864-2882.]
- [57] Ge Dazhuan, Long Hualou. Rural spatial governance and urban-rural integration development. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(6): 1272-1286. [戈大专, 龙花楼. 论乡村空间治理与城乡融合发展. *地理学报*, 2020, 75(6): 1272-1286.]
- [58] Sun Bindong, Jin Xiaoxi, Lin Jie. China's new pattern of urbanization toward coordinated development of large, medium and small cities: Evolution and determinants of city size distribution since 1952. *Geographical Research*, 2019, 38(1): 75-84. [孙斌栋, 金晓溪, 林杰. 走向大中小城市协调发展的中国新型城镇化格局: 1952年以来中国城市规模分布演化与影响因素. *地理研究*, 2019, 38(1): 75-84.]
- [59] Sun Bindong, Zheng Xiaohui. From the "pole-axis system" theory to the polycentric and coordinated regional development model of large countries. *Acta Geographica Sinica*, 2024, 79(12): 2991-3006. [孙斌栋, 郑晓辉. 从“点—轴系统”理论到大国多中心区域协调发展模式. *地理学报*, 2024, 79(12): 2991-3006.]
- [60] Wang Wanting, Wu Dun, Su Lide, et al. Analysis of distribution pattern evolution and its driving factors of settlement in Tumote plain(1934-2019). *The Chinese Historical Geography*, 2022, 42(3): 87-100, 155. [王婉婷, 乌敦, 苏力德, 等. 土默特平原聚落分布形态演变及其驱动因素分析(1934—2019). *历史地理研究*, 2022, 42(3): 87-100, 155.]
- [61] Ning Yumin. New process of urbanization: Dynamics and features of urbanization in China since 1990. *Acta Geographica Sinica*, 1998, 53(5): 88-95. [宁越敏. 新城市化进程: 90年代中国城市化动力机制和特点探讨. *地理学报*, 1998, 53(5): 88-95.]
- [62] Li Qiang, Chen Yulin, Liu Jingming. On the "development model" of Chinese urbanization. *Social Sciences in China*, 2012(7): 82-100, 204-205. [李强, 陈宇琳, 刘精明. 中国城镇化“推进模式”研究. *中国社会科学*, 2012(7): 82-100, 204-205.]
- [63] Yang Ren, Lin Yuancheng. Rural digitalization and rural spatial transformation. *Acta Geographica Sinica*, 2023, 78(2): 456-473. [杨忍, 林元城. 论乡村数字化与乡村空间转型. *地理学报*, 2023, 78(2): 456-473.]

General model of settlement size distribution: Extension deduction and regional demonstration

CHANG Xiaodong¹, WANG Shijun^{1,2,3}, YANG Zhipeng⁴,
LI Zhuowei¹, XIE Mingke¹, LONG Wang⁵

(1. School of Geographical Sciences, Northeast Normal University, Changchun 130024, China; 2. Key Laboratory of Geographical Processes and Ecological Security of Changbai Mountains, Ministry of Education, Northeast Normal University, Changchun 130024, China; 3. Institute for Northeast China Research, Northeast Normal University, Changchun 130024, China; 4. School of Geographical Sciences, Hebei Normal University, Shijiazhuang

050024, China; 5. School of Economics and Management, Hezhou University, Hezhou 542899, Guangxi, China)

Abstract: The rank-size model of settlement size distribution is an important meta-model and meta-knowledge for understanding the evolution of urban-rural regional system. At present, the rank-size method has been widely used in the study of urban settlement system structure, but its application in rural geography is relatively lagging behind. Under the background of the cross-integration of urban and rural geography in the new era, it is an important theoretical innovation to explore the unified size distribution law of urban and rural regional system, and it is of great practical significance to build a new pattern of urban and rural integration. Based on previous research and mathematical abstraction, this paper carries out the expansion of the settlement size distribution meta-model-rank-cumulative size model hypothesis-deductive experiment and the empirical research in Northeast China, and makes a comparison between multiple models, multiple perspectives, and multiple time and space, in order to preliminarily summarize the general model of the size distribution of urban and rural settlement system. The conclusions are as follows: (1) Based on the idea of mathematical function, this paper infers the mathematical properties of the rank-cumulative size model, and sums up three potential models (linear model, power function type, logarithmic type) suitable for describing the size distribution of urban and rural settlements. Then, the hypothesis conditions are put forward and a variety of clustering types are constructed for parallel comparison experiments, which is different from the empirical paradigm, expands the scope of application of the model, and also introduces new settlement size distribution parameters. (2) In the multi-model comparison of hypothesis-deductive experiments, the rank-cumulative size model has prominent advantages over the 'Lotka-Zipf' model and the rural rank-size model, which are mainly manifested in high goodness of fit, wide application range and strong robustness. However, the most suitable rank-cumulative size model shows segmentation characteristics with the change of Zipf. (3) The results of empirical in Northeast China and hypothesis-deductive experiments are highly consistent. On the one hand, the rank-cumulative size model has a good effect on characterizing the size distribution of the settlement system in Northeast China, and is superior to the 'Lotka-Zipf' model and the rural rank-size model in terms of goodness of fit, range of application and robustness. On the other hand, the most suitable rank-cumulative size model is different due to different settlement types, which is essentially Zipf heterogeneity without significant time and regional heterogeneity. (4) On the basis of hypothesis deduction and regional demonstration, the rank-cumulative size model is suitable as a general model for the size distribution of urban-rural settlement system, which can be expressed as a piecewise function of power function and logarithmic function according to the change of Zipf. The geographical significance of the parameters of the model needs to be further explored, and the model also has great application potential for the optimization and reconstruction of the national urban and rural settlement system.

Keywords: urban-rural integration; settlement size distribution; rank-size; rank-cumulative size model; Zipf; Northeast China