

# 2000 年来中国人口地理演变的 Agent 模拟分析

吴 静<sup>1</sup>, 王 铮<sup>1,2,3</sup>

(1. 华东师范大学教育部地理信息科学重点实验室, 上海 200062;

2. 中国科学院科技政策与管理科学研究所, 北京 100080; 3. 中国科技大学管理学院, 合肥 230026)

**摘要:** 以基于自主体模拟为建模工具, 建立了包含气候、农业、社会影响因素的中国 2000 年来人口地理演变模型。基于该模型对南北人口格局的转变、东西人口格局 (即胡焕庸线) 的形成以及 2000 年来全局人口分布演化的动力机制做了分析。研究结果表明: 在不考虑气候变化、农业生产潜力波动以及社会因素影响的情景下, 中国各省人口模拟值与实际值的相关系数达到 0.9733, 省区间初始农业生产潜力差异决定了人口的基本分布状态, 是人口分布特征的内在因素, 对人口地理演化具有深远的影响; 中国人口分布南重北轻的人口分布格局发生在 910 年代左右, 以安史之乱导致的战祸和动荡的社会条件为主要演化动力; 胡焕庸线中国人口东西部分布格局形成于 1235-1255 年代左右, 以 1230-1260 A.D. 的气候突变为该人口分布特征线形成的主要动力; 气候变化对 2000 来历史人口分布的全局演化过程中起了主导驱动作用, 在单影响要素的情景中, 气候变化对全局人口分布形成的贡献率最大, 为 0.9869, 进一步, 气候变化对人口地理演化的影响以 1230-1260 A.D. 的气候突变为转折点表现为阶段性差异。

**关键词:** 基于自主体模拟; 气候变化; 历史人口; 人地关系; 中国

## 1 引言

中国文明史的一个重要问题是, 中国人口最初集中在黄河流域, 现在的人口重心却迁移到长江流域, 那么人口地理分布是如何动态演化的呢? 更进一步我们要问是什么因子驱动了中国人口流向中国南方, 特别是诸多的因子中, 哪些因子的作用更大? 当前对于中国历史人口的研究, 主要集中在历史时期人口规模的统计和人口发展的考察, 代表性的研究有葛剑雄<sup>[1]</sup>, 赵文林<sup>[2]</sup>, 这两本著作系统地统计、描述了中国近 2000 年来历朝人口发展历程; 然而, 近年来对中国历史人口地理演变的影响因子分析的研究却鲜见报道, 从检索到的文献看, 这方面的研究多集中于二十世纪末期, 如李伯重<sup>[3]</sup>基于历史资料分析描述了气候变化对中国历史人口的影响; 张伟兵<sup>[4]</sup>探讨了历史时期水灾与人口发展的关系。纵观前人的研究, 在研究方法上多采用基于历史资料的静态统计分析。葛剑雄<sup>[1]</sup>认为人口发展的一些偶然因素和长远变化是无法通过当代人口研究来考察。也就是说, 长期影响人口地理演变的因素必须被放置在一个长时间尺度的背景下来进行研究, 这就对数据的全面性提出了很高的要求, 缺乏其中任何一个时间截面的数据都将使研究无法进行, 我们认为正是这个原因使得近年对历史人口地理演变影响因素的研究处于停滞状态。考虑到人口系统演变过程的动态性、复杂性, 其每个环节都与当时的自然环境、社会条件、技术经济水平等等诸多因素密切联系相互作用, 而人口地理的形成又取决于人口个体在地理环境中的迁移, 这就构成了一个典型的自底向上的复杂系统, 因此本文从动态模拟

收稿日期: 2007-07-12; 修订日期: 2007-12-11

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40771076) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.40771076]

作者简介: 吴静 (1981-), 女, 浙江人, 博士研究生, 研究方向为地理计算。E-mail: wujing666@hotmail.com

通讯作者: 王铮 (1954-), 男, 云南人, 教授, 博士生导师, 中国地理学会会员。主要从事经济计算、地理计算、区域科学与管理研究。E-mail: wangzheng@mail.casipm.ac.cn

的思想出发,引入基于自主体 (Agent-based Simulation, ABS) 模拟来研究中国 2000 年来人口地理的动态演变。王铮等<sup>[5]</sup>认为在地理学中自主体是物理粒子按行为规则在地理环境中进行行为活动的模拟,它反映了人与环境交互影响的过程,它是地理学问题中复杂、动态、随机问题的有效模拟方法。

不同于传统的基于方程的建模 (Equation based modeling, EBM) 方法,ABS 的模型由若干封装了独立行为能力的自主体组成,而其执行过程即为自主体的行为活动<sup>[6]</sup>。Axelrod<sup>[7]</sup>认为系统模拟,特别是 ABS 模拟,已经成为科学研究中除归纳和演绎之外的第三种重要研究方法。事实上,以 ABS 或融合了元胞自动机的 ABS 为分析工具,国内外学者都已经展开了广泛的应用研究;Sasaki<sup>[8]</sup>在栅格环境下对经典地理学理论—杜能区位论进行了重新建模实现,证实了 ABS 在空间分布研究中是合适的方法。采用 ABS 解决复杂空间问题的研究还包括 Portugali 和 Benenson<sup>[9]</sup>, Berger<sup>[10]</sup>, Parker 等<sup>[11]</sup>, Bonnefov<sup>[12]</sup>等,这些研究都为我们进行人口地理的空间演化提供了经验;另一方面,Dean<sup>[13]</sup>研究 1300 年左右亚利桑那州 Anasazi 地区文明的瓦解,认为是社会和环境共同作用导致了社会的崩溃;这是应用 ABS 回答历史事件的一个范例;Kohler<sup>[14]</sup>模拟了美国西南部四角落地区的古代社会演化,模拟出来的虚拟住所与实际考古所得位置非常接近;这两个案例都是我们的研究最值得借鉴的。

基于上述研究,本文以 ABS 模拟与元胞自动机结合的建模,构建了中国自西汉 (2 A.D.) 至 2003 年人口分布形成的演化模型,以研究中国人口地理的演变动力。

## 2 研究方法 with 数据来源

### 2.1 研究方法

地理系统的复杂性模拟涉及到个体运动和地理环境变化,由于现行流行的自主体模拟软件不能很好刻画这两种动力学机制问题。应用王铮、吴静<sup>[5]</sup>提出的方法本文基于自主体建模思想结合元胞自动机建模自行设计开发了模拟系统。该系统主要包含两个层次,即元胞层和自主体层。自主体用于模拟具有独立活动能力的人口个体,而元胞层用于模拟自主体活动的地理环境。基于人地关系理论,作为人口粒子的自主体在元胞所表征的地理空间中游走或定居,每个元胞所包含的人口粒子数决定了其所处的状态,反之,元胞状态的转变也改变了其对人口粒子吸引力的大小,元胞层与自主体层在相辅相成的关系中动态演化。由于篇幅有限,本文将主要介绍模型的核心部分,关于 ABS 模型的细节就省略了。图 1 描绘了自主体层的内部框架结构,可以看到,在我们的模型中,人口系统受到了气候子系统,农业子系统以及社会子系统的影响。

在气候子系统中,历史降水和气温的波动是模型考虑的主要因素,并根据刘啸雷,王铮<sup>[15]</sup>,王铮等<sup>[16]</sup>关于气候特征变动引起农业生产潜力变化率,见式 (1),据此我们以 2003 年中国各省农业生产潜力为基准推算出历史时期农业生产潜力,从而刻画了气候变化作用于农业子系统内的农业生产潜力波动而影响人口的分布变化。

$$\frac{\delta P_a}{P_a} = \frac{\delta P}{P} + \frac{2b_1}{\frac{a_1}{T_1} + b_1 T_1} \delta T - \frac{2b_2}{\frac{a_2}{T_2} + b_2 T_2} \delta T_2 \quad (1)$$

式中:  $P$  为年降水量,  $T$  为年均温,  $T_1$ ,  $T_2$  为年均温的线性变换,其中  $T_1 = T + 2.991$ ,  $T_2 = T/20 + 1.9$ , 参数  $a_1 = 125.727$ ,  $a_2 = 0.059$ ,  $b_1 = 0.320$ ,  $b_2 = 0.112$ , 温度单位为  $^{\circ}\text{C}$ , 降水单位为 mm。

在社会子系统中,我们主要考虑的是由社会政治环境引发的大规模人口迁移,主要包括: 307 A.D.至 312 A.D.永嘉之乱,为了躲避战乱、灾荒,黄河流域的广大人民大规模

迁移至江苏、安徽、湖北、四川等地，迁移人口达 90 余万人<sup>[17]</sup>；755 A.D.至 763 A.D.，安史之乱使中原地区的人民被迫迁移至长江流域、珠江流域，迁移规模达 100 余万人(<http://www.dlgw.net/>

XuanXiuJiaoCan/ShowArticle.asp?ArticleID=875)；1127 A.D.的靖康之乱使黄河流域的人民又一次大规模迁往南方浙江、江苏、湖北、四川，规模达 500 万人<sup>[18]</sup>；康熙十年 (1671 A.D.)至乾隆四十一年 (1776 A.D.)，前后 105 年间从湖南、湖北、广东等地迁入四川的移民共达 623 万人<sup>[19]</sup>，史称“湖广填四川”。

在人口子系统中，我们将 2 A.D.的 6000 万<sup>[11]</sup>人口按当时的统计分布到各个省区，得到模型演化的初始状态。模型运行中，以 Wilson<sup>[20]</sup>为基础，构造了人口迁移推拉模型，在系统运行的每个周期 (即一年) 人口自主体由于受到本区域人口规模的推力以及其他区域农业生产潜力的拉力作用，从而发生迁移。

基于建模，本文主要采用了情景比较方法以考察人口地理演变的动力机制，但是必须指出，本文不是情景分析，而是模拟重演。因为通常的情景分析采用的是虚拟事件影响后果的估计，本文则是通过假设改变历史上真实事件的发生，从而查看历史真实事件的冲击结果与现实的差异，是事实分析和反事实分析<sup>[21]</sup>。

### 2.2 数据来源

基于建模，模型所需的数据主要包括两大方面：一是用于元胞层的地图数据；二是用于自主体层的人口初始分布、历史气候数据、历史农业生产潜力数据以及历史性人口大迁移的统计数据。

地图数据主要来源于国家基础地理信息系统数据库 ([http://nfgis.nsd.gov.cn/nfgis/chinese/c\\_xz.htm](http://nfgis.nsd.gov.cn/nfgis/chinese/c_xz.htm))，采用 1:400 万全国省界图和全国三级以上河流分布图，通过 Arcgis 将矢量数据转化为栅格数据，从而应用于模型中，每个栅格对应一个元胞。在自主体层中，人口的初始分布根据葛剑雄<sup>[22]</sup>、赵文林<sup>[2]</sup>关于 2 A.D.全国各省人口分布密度统计。历史温度数据采用王铮、张丕远<sup>[23]</sup>的结果。这个曲线是以竺可桢<sup>[24]</sup>的认识为基础，结合竺可桢以后的研究成果，但对宋代的气温作了校正，也对南北朝的时期的温度适当调整，对竺可桢温度曲线的修正理由见满志敏等<sup>[25]</sup>，张丕远等<sup>[26]</sup>。对于降水曲线采用了李裕元<sup>[27]</sup>的结果。作为基年农业生产潜力，我们计算了各省 2003 年农业生产潜力，数据来源于《1960~1970 年中国地面气候资料》。关于历史性人口大迁移，永嘉之乱、安史之乱以及湖广填四川的数据分别来源于葛剑雄等<sup>[17]</sup>、吴松弟<sup>[18]</sup>和陈世松<sup>[19]</sup>。

### 2.3 模型检验

为了确保模型的正确性，我们设定情景 1：考虑所有干扰因素。情景 1 下，各省人口模拟值与实际值的相关系数为 0.9786，将情景 1 的模拟结果其与实际值做 Z 检验，得 Z 值为 0.211，小于其单尾临界值 1.64，小于双尾临界值 1.95，可得模拟结果与实际分布无

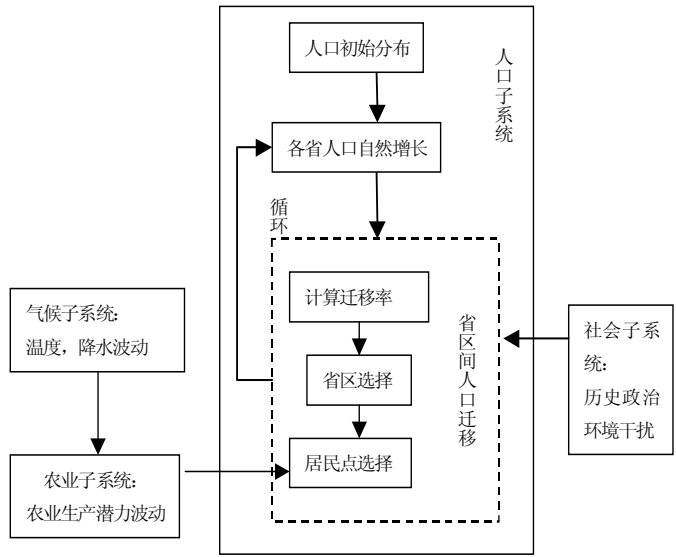


图 1 自主体层流程图

Fig. 1 The architecture of agent simulation

显著差异，说明了本文建立的模型能有效得模拟中国历史时期人口分布形成。图 2 为情景 1 的模拟值与实际值做的散点拟合图，两组数值吻合良好，对应的线性关系如式 (2):

$$y = 0.988x + 46.8 \quad R^2 = 0.9575 \quad (2)$$

式中： $x$  为模拟值， $y$  为实际值。可以看到在  $R^2$  值达到 0.9575 的情况下，模拟值对实际值的贡献率达到 0.988，这说明了系统的模拟结果是相当理想的。

作为模拟的截面模拟结果，图 3 显示了中国历史两大鼎盛时期唐代 (713 A.D.) 和清代 (1820 A.D.) 的人口分布情况，结合袁祖亮<sup>[27]</sup>对唐代和清代人口研究的结果，唐代各省人口模拟值与实际值高度相关，相关系数为 0.87，而清代的模拟结果与实际值的相关系数为 0.83，也呈现高度相关，表明模型能较好地模拟人口分布的演化过程。

值得注意的是，对 2000 年来人口分布演化过程的模拟中，基于情景 1 的模拟，南方人口总数超过北方人口总数的时间大约在 918 A.D.，此后人口分布南重北轻的格局也始终未再改变。换言之，模拟显示中国分布南重北轻的格局是在唐末到五代之间开始形成的。葛剑雄<sup>[4]</sup>研究表明：“到五代时，南方一些割据政权拥兵自保，完全摆脱了对北方的财政负担，有了进一步兴修水利、发展农业的余力，经济地位更加稳定。所以可以断言，南方人口超过北方的事态至此已经定型。”葛剑雄<sup>[30]</sup>的历史推断与我们的模拟结果不谋而合，相互验证，进一步说明了模拟的可靠性。

### 3 模拟结果分析

#### 3.1 农业生产潜力的作用分析

农业生产潜力是一个地区的自然禀赋条件的综合反应，内在决定了一个地区的人口

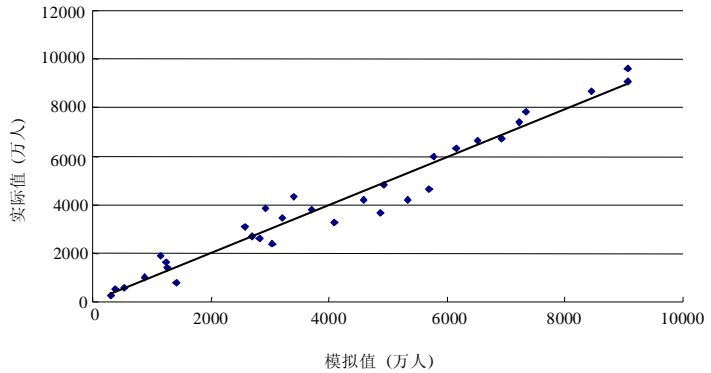


图 2 情景 1 的模拟值与 2003 年中国各省人口统计值的散点图  
Fig. 2 The scatter plot based on simulation result of Scenario 1 and statistic records of 2003

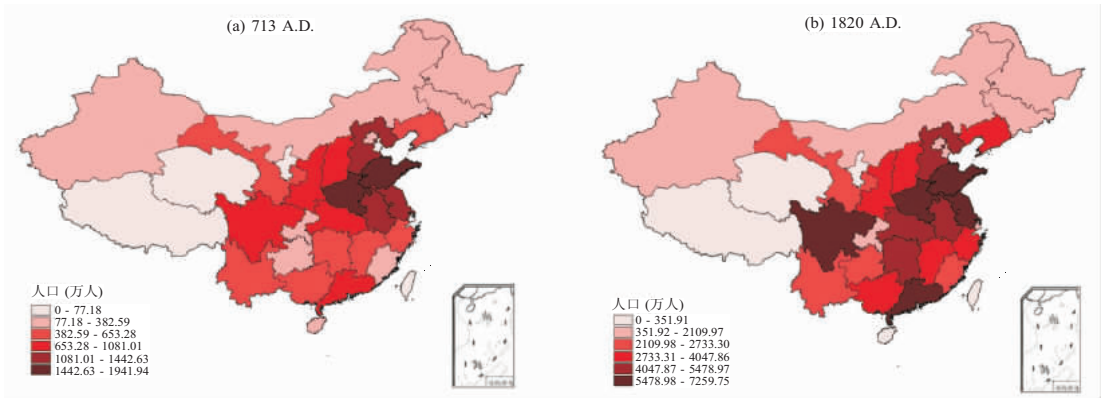


图 3 713 A.D.和 1820A.D.中国人口分布状况

Fig. 3 The population distribution in 713A.D. and 1820A.D.in China

承载力, 因此, 在研究气候变化对人口演化的动态影响之前, 我们有必要先衡量农业生产潜力的作用。为此, 我们将情景 2 设置为: 忽略气候变化以及各次大规模迁移对人口分布的干扰。

基于情景 2 的模拟, 各省人口模拟值与 2003 年统计实际值的相关系数为 0.9733, 通过散点图添加趋势线得到模拟结果对实际值的贡献率为 0.9668, 此时  $R^2$  值为 0.9473。那么, 从统计的数值上看, 在忽略所有干扰因素的情况下, 系统对历史人口分布的模拟仍然是显著有效的, 但是其显著性不如情景 1。现代的人口地理分布与现代农业生产潜力分布有好的一致性。这表明, 由地理环境条件奠定的农业生产潜力是人口的空间分布的内在动因, 决定了人口空间分布的基本格局, 对人口人地关系的形成具有最直接的影响。

从南北方人口格局来看, 情景 2 中南方人口规模超过北方的时间大约在 1027 A.D., 比情景 1 的 918 A.D. 晚了大约一个世纪。很明显, 这是由于在情景 2 中我们忽略了气候变化以及各次大规模人口迁移等外部因素, 这减缓了北方人口向南方各省迁移的速度, 因此, 南方人口规模超过北方人口的时间较情景 1 的模拟结果推迟了大约一个世纪。那么, 为什么早期人口是北重南轻呢? 这是因为南方地区陆地生态系统初级生产力强, 在农业技术水平低的上古时期, 人类难于开发土地, 而且湿热气候导致疾病众多, 司马迁就发现“江南卑湿, 丈夫早夭”(《史记·货殖列传》), 在上古的技术水平下, 湿热地区不适合人类的生存。这从世界古文明总是发祥于半干旱半湿润气候区得到佐证。因此我国的农业和人口在黄河流域首先得到充分的发展。但是随着人类社会和文明的不断发展, 以及技术进步带来的生产力水平的提高, 使得南方逐渐得到开发, 同时历史气温也有所下降, 有利于南方开展农业生产活动, 在理论上南方各省总农业生产潜力大于北方是不可改变的事实, 因此, 在技术进步的推动下, 人口必然会借助技术力量迁移到农业生产潜力更高的南方, 以调节人口规模与生活资料来源的匹配。由此可见, 技术进步对人地关系演变有对人类积极的推动作用, 至少在古代是这样。

### 3.2 南北方人口分布格局的转变及其动力分析

南北方人口格局的转变是中国历史人口发展的一个重大事件, 我们将分析是南北方人口格局的转变动力, 为此设置了以下几种事件情景: ① 情景 3a: 仅考虑气候变化; ② 情景 3b: 考虑气候变化与永嘉之乱; ③ 情景 3c: 考虑气候变化、永嘉之乱以及安史之乱; ④ 情景 3d: 考虑气候变化、永嘉之乱、安史之乱以及靖康之乱(“之乱”是传统的用词, 作者认为从各民族平等出发, 把这些“之乱”称为“之变”比较中性, 虽然我们采用历史学界的传统用法)。基于情景 3a 至 3d, 我们模拟得到各情景下南北方人口格局发生转变的年代(表 1)。

观察情景 3c 和情景 3d 的模拟结果, 并对比情景 1 下模拟得到的南北人口格局发生转变的年代 918 A.D., 安史之乱发生 918 A.D. 之前, 而靖康之乱发生在 919 A.D. 之后, 因此靖康之乱理论上不应该影响这个数据, 所以这里的差距  $919 - 916 = 3$ , 是本文模拟的随机误差。由此可以得到中国人口南北分布的逆转大约发生在 910 年代左右, 其年代为唐亡后的五代十国初期。

进一步分析, 我们得到情景 3a 比情景 2 提前 14 年, 情景 3b 比情景 3a 提前 24 年, 而情景 3c 比情景 3b 提前 70 年, 由此可知, 安史之乱对南北方人口格局的影响是最大的。进一步, 导致这一大规模人口迁移的内在原因在于当时纷繁的战乱和动荡的社会政

表 1 各情景下中国南北人口格局转变年代对比

Tab. 1 Comparison of the simulation year of north-south population reversion in each scenario

情景	情景 2 (忽略所有因素)	情景 3a (仅气候变化)	情景 3b (气候 + 永嘉)	情景 3c (气候 + 永嘉 + 安史)	情景 3d (气候 + 永 + 安 + 靖)
年代 (A.D.)	1027	1013	989	919	916

治经济条件,使得中原的人们纷纷南迁。也就是说,中国南重北轻的人口格局形成的主要动力在于不安定的社会条件对人口系统的极大干扰。

值得注意的是气候变化对南北方人口格局并没有太大的影响,原因何在呢?结合中国近2000年气温波动,我们认为,在900 A.D.之前,中国的气候基本处于较温暖的状态<sup>[7]</sup>,有利于农业生产,从而增大了北方各省的农业供给能力,人口迁出较缓慢,对南北方格局转变影响小。早期的气候变化在形成中国人口南北分布的格局中影响并不大。这是预期的,因为如果不是气候系统结构的变化,纬度地带的推移不足以导致人口南北分布格局的明显变化。但是这里得不到气候变化对人口分布影响小的结论。张丕远等<sup>[7]</sup>认为以气候突变的规模计,近2000年的气候突变发生的规模大小依次是1230-1230's A.D., 260's A.D., 880's A.D., 910's A.D.发生南北人口格局变化时,中国近2000年的最大气候突变还没有发生,只能说气候变化在一定强度的范围内,还不足以引起人口分布的大规模变化。880's A.D.气候变化的直接影响还没有显示出来,从而突出了在南北人口格局转变中安史之乱的主要推动作用。

### 3.3 东西部人口分布格局的形成及其动力分析

如同人口分布的南北格局一样,中国人口的东部分布格局也是我们关注的问题之一。1935年,胡焕庸提出了中国人口分布存在黑河—腾冲分界线<sup>[29]</sup>(即胡焕庸线),指出以此为界,东部人口占94.4%,西部人口仅占5.6%。王铮等<sup>[29]</sup>发现,中世纪温暖期以后,13世纪开始,中国的旱涝分布等值线出现平行胡焕庸线的方向。我们进一步要问,在历史人口地理演变的过程中,象征中国人口东西分布差异的这条分界线又是何时出现的呢?其产生动力又是什么?

基于情景1,即在模型中考虑历史气候变化、历史农业生产潜力波动以及历史性大规模人口迁移对人口地理演化的影响。模拟结果显示,中国人口分布显著的东密西疏格局大约形成于1246 A.D.,即在1246 A.D.左右黑河—腾冲线以东的人口规模占到全国94.4%,而西部只占5.6%,并在1246 A.D.之后的人口发展历程中,东部人口所占比例在94%至95%之间波动。以1246 A.D.为界是一个模拟推断,由于历史发展的复杂性,我们可以说胡焕庸线的形成大约在 $1246 \pm 9$  A.D.,这里的9年误差是依据前面发现一个样本存在3年误差并按误差理论的3原则估计的,考虑到精度的问题,可以说胡焕庸线的形成大约在1235-1255 A.D.。

中国历史人口东西分布格局形成于1246 A.D.左右,这并不是偶然的。首先,由于自然禀赋的差异,中国东西部各省在农业生产潜力上存在本质的差别,这就导致了在模型初始状态下,东西部人口水平的不同,总体上说东部人口远远超出西部人口,也就是说人口东西部差异是具有本质根源的,但这种差异并未达到胡线的格局。而且在1246 A.D.左右也不存在大规模的人口迁移。综合各方面考虑,我们认为,人口分布特征线的产生只所以发生在1246 A.D.左右是1230 A.D.-1260 A.D.期间气候突变影响的结果。张丕远等<sup>[20]</sup>研究表明,1230 A.D.-1260 A.D.是中国历史气候的最大突变期,这一气候突变奠定了中国现代季风气候的格局,主要以黑河—腾冲线为界,东部地区湿润温暖,农业密度大,人口集中;西部干燥,冬季严寒,植物生长条件恶劣,人口稀少。而且东部地区年均温、年降水、活动积温呈现平行胡线方向的特征<sup>[26]</sup>。也就是说在1230 A.D.以后胡线方向的气候、环境分异特征已经稳定存在,王铮等<sup>[30]</sup>进一步证实了胡线在生态环境及一般自然地理分异特性方面具有特征方向的意义。在生产力水平低下的古代,农业生产潜力主要由气候条件决定,伴随气候变化的主要是土地资源数量和农业产出的变化,这种变化影响到了作为一个种群的人口,人口因农业产出的区域不同而改变自己的分布<sup>[31]</sup>,最终于1246 A.D.左右人口东西分布与生态环境分布特征吻合:以黑河—腾冲线为界,东西部呈现显著分布差异。

经过模拟分析, 我们认为, 中国历史人口东西部分布的胡线特征出现在 1240-1250 年代左右, 进一步, 1230 A.D. 的气候突变是这一人口特征线出现的主要动力。换言之, 带有气候系统结构性变化的气候突变而不是一般的气候波动是驱动中国人口东西分布格局形成的动力因子。

### 3.4 现代人口分布形成的动力分析

前文分别讨论了气候变化与中国人口分布南北方格局、东西部格局形成的内在关系, 这只是人口地理演变的阶段性分析, 那么, 下文我们将立足全局, 比较分析模型中涉及的各种干扰因素对中国 2000 年来全局人口分布形成的作用。为此, 我们设置了以下几种情景: ① 情景 4a: 仅考虑气候变化; ② 情景 4b: 仅考虑永嘉之乱; ③ 情景 4c: 仅考虑安史之乱; ④ 情景 4d: 仅考虑靖康之乱; ⑤ 情景 4e: 仅考虑湖广填四川;

基于对情景 4a—情景 4e 的模拟, 得到五种情景下模拟值与实际值的拟合结果, 分别如公式 (3)~(7):

$$y = 0.9869x_c + 51.523 \quad R^2 = 0.9585 \quad (3)$$

$$y = 0.9828x_y + 67.651 \quad R^2 = 0.9518 \quad (4)$$

$$y = 0.9844x_a + 59.728 \quad R^2 = 0.9523 \quad (5)$$

$$y = 0.9822x_j + 70.496 \quad R^2 = 0.9557 \quad (6)$$

$$y = 0.9846x_h + 59.445 \quad R^2 = 0.9533 \quad (7)$$

式中:  $x_c$ ,  $x_y$ ,  $x_a$ ,  $x_j$ ,  $x_h$  分别为仅考虑气候保护, 永嘉之乱, 安史之乱, 靖康之乱和湖广填四川事件的模拟结果,  $y$  为 2003 年人口实际值。由于相关系数都很大而且没有明显的差异, 这里的回归系数越大, 说明影响因子的重要性大, 相应情景因素的贡献大。

比较公式 (3)~(7), 可以发现所有相关系数都在 0.95 附近, 所以相关性无差异, 因而回归系数反应了一种因子贡献。容易发现考虑气候变化所得到的模拟结果对实际值的贡献率最大, 为 0.9869, 而在几次大规模人口迁移中, 对现代中国人口地理分布, 安史之乱贡献最大。

这个结果表明在历史人口分布形成的过程中, 气候变化比几次大规模人口迁移对人口分布具有较大的贡献。究其原因, 主要有两个方面: 首先气候变化使农作物的种植区域发生迁移, 引起农业生产潜力的波动, 从而推动人口的迁移, 这种动力是气候变化对人口分布演化直接的长期持续存在的影响; 另外, 根据张丕远, 王铮, 刘啸雷<sup>[29]</sup>对中国近 2000 年来气候演变的阶段性研究表明, 中国近 2000 年来, 280 A.D. ( $\pm 25$  年)、880 A.D. ( $\pm 25$  年) 和 1230~1260 A.D. ( $\pm 25$  年) 为中国历史气候的突变阶段。比较该气候突变期与永嘉之乱、安史之乱及靖康之乱的发生时期, 我们不难发现, 311 A.D. 的永嘉之乱正是处于第一次气候突变之后, 这不是单纯的巧合。永嘉年间, 北方游牧民族大规模入侵中原, 可能起因于气候的大幅度变化改变了人类的生存环境, 特别是在气候敏感地区, 由此触发了人类迁移, 即气候变化间接推动了人口的大规模迁移。说明了历史气候变化对人口分布影响的复杂性。

值得注意的是, 气候变化对 2000 年来中国人口地理演变的贡献率超出了各次大规模人口迁移的贡献率, 这与 3.2 节中各因素对人口南北方格局转变的影响似乎不完全一致。究其原因, 在 880-1230 A.D. 年间, 胡焕庸方向不存在, 280-880 AD 胡焕庸方向不明显, 旱涝气候分布的纬度地带性和经度地带性方向明显<sup>[30]</sup>, 因此气候变化主要引起的是农业生产潜力等值线界线在南北方向的平行进退, 导致了农业生产潜力沿经线方向一致性地变小或者变大, 这样气候变化虽然对全国人口总量产生明显影响但对南北人口分布比重的影响却较小, 除非在大气环境边界对应的生态脆弱带; 但是这并不意味着气候变化的作用不重要。实际上张丕远等<sup>[26]</sup>, 王铮等<sup>[30]</sup>认为 1230-1260 A.D. 的气候突变是中国近 2000 年来最大的气候转折, 它奠定了中国现代季风气候的格局, 中国东西部环境分异表现出

胡焕庸方向特征。生态环境的胡线方向特征直接导致了人口空间分布朝该特征线变化,此后气候变化对人口格局形成的作用凸显。从另一方面也说明了气候变化对人口分布形成作用的阶段性差异。

同时,在四次大规模人口迁移中,湖广填四川和安史之乱的贡献率明显较永嘉之乱以及靖康之乱大,说明湖广填四川和安史之乱对历史人口分布的形成意义重大。如前文所述,安史之乱对中国人口南北方格局的形成具有不可替代的作用;而清前期的湖广填四川移民运动,改变了汉、唐以来由北向南移民的格局,开创了由东向西大移民的先例<sup>[32]</sup>。

## 4 结论与讨论

基于 ABS 技术,本文模拟研究了中国 2000 年来人口分布演化的动态,并且解析了部分成因,并且试图对中国历史人口地理的某些问题和历史气候变化对中国人口地理的影响给出新的动力解释,主要结论如下:

(1) 在不考虑气候变化、农业生产潜力波动以及历史性大迁移影戏因素的条件下,中国各省人口模拟值与 2003 年实际值的相关性达到 0.9733,表明中国各省农业生产潜力的现在差异决定了人口现代分布的基本格局。农业生产潜力是人地关系格局形成的最基本动力。

(2) 中国人口分布南北格局的转变发生在 910 年代左右,这个人口分布格局形成的主要动力在于安史之乱导致的战祸和动荡的社会条件。

(3) 中国人口东西部分布的显著差异形成于 1235-1255 年左右,可能是 1230-1260 A. D. 的气候突变促成了中国季风气候的格局,使得东西部表现为显著的生态环境差异,对东西部人口分布格局具有关键推动作用。

(4) 在仅考虑气候变化影响因素的情景下,模拟值对实际值的贡献率为 0.9869,该值较其他情景的贡献率大,表明气候变化对 2000 来历史人口分布的全局演化起了主导驱动作用,并以 1230-1260 A. D. 的气候突变为转折表现为阶段性影响差异;在此之前气候变化对人口分布的直接影响较小,而在此之后气候变化对人口分布影响作用凸显。这就是说,人地关系具有复杂性,气候变化只有达到某种强度才会对人口的地理分布带来明显影响。

本文作为本研究的初步成果,在模型设计中对于一些问题的假设还有待改进,需要在以后的工作中进一步深化。

## 参考文献 (References)

- [1] Ge Jianxiang. Population Development in China. Fuzhou: Fujian People's Press, 1991. 344. [葛剑雄. 中国人口发展史. 福州: 福建人民出版社, 1991. 344.]
- [2] Zhao Wenlin, Xie Shujun. Population History in China. Beijing: People's Publishing House, 1998. 44-49; 229-230. [赵文林, 谢淑君. 中国人口史. 北京: 人民出版社, 1998. 44-49; 229-230.]
- [3] Li Bozhong. The influence of climate change on China's historical population fluctuation. Population Research, 1999, 23(1): 15-19. [李伯重. 气候变化与中国历史上人口的几次大起大落. 人口研究, 1999, 23(1): 15-19.]
- [4] Zhang Weibing, Li Peihong. The relation between historical population and flood. Population Research, 1999, 23(5): 25-31. [张伟兵, 黎沛虹. 历史时期人口与水灾关系探讨. 人口研究, 1999, 23(5): 25-31.]
- [5] Wang Zheng, Wu Jing, Yang Nian. A review and prospect of the multi-agent applications in Geography. Complex Systems and Complexity Science, 2005, 2(3): 52-60. [王铮, 吴静, 杨念. 多自主体在地理学中应用的回顾与展望. 复杂性科学与复杂系统, 2005, 2(3): 52-60.]
- [6] Parunak H V D, Savit R, Riolo R L. Agent-based modeling vs. equation-based modeling: A case study and users' guide. In: Sichman J S, Conte R, Gilbert N (eds.). Multi-Agent Systems and Agent-Based Simulation. Berlin: Springer, 1998. 10-25.
- [7] Axelrod R, Tesfatsion L. A guide for newcomers to agent-based modeling in the social sciences. In: Tesfatsion L, Judd



- K L (eds.). Handbook of Computational Economics, Vol. 2: Agent-Based Computational Economics, Handbooks in Economics Series, North-Holland, Amsterdam, 2006.
- [8] Sasaki Y, Box P. Agent-based verification of von Thünen's location theory. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 2003, 6(2).
- [9] Parunak H V D, Savit R, Riolo R L. Agent-based modeling vs. equation-based modeling: A case study and users' guide. In: Sichman J S, Conte R, and Gilbert N (eds.). *Multi-Agent Systems and Agent-Based Simulation*. Berlin: Springer, 1998. 10-25.
- [10] Berger T. Agent-based spatial models applied to agriculture: A simulation tool for technology diffusion resource use changes and policy analysis. *Agriculture economics*, 2001, 25: 245-260.
- [11] Parker D C, Manson S M, Janssen M A et al. Multi-agent systems for the simulation of land-use and land-cover change: A review. *Annals of the Association of American Geographers*, 2003, 93(2): 314- 337.
- [12] Bonnefov J L. From household to urban structures: Space representation as engine of dynamics in multi-agent simulations. *CyberGeo*, 2003: 234.
- [13] Dean J S, Gumerman G J, Epstein J M et al. Understanding Anasazi culture change through agent based modeling. In: Kohler T, Gumerman G (eds.). *Dynamics in Human and Primate Societies: Agent Based Modeling of Social and Spatial Processes*. New York & London: Oxford University Press, 2000: 79-205.
- [14] Kohler T A, Gumerman G J, Reynolds R G. Simulating ancient societies. *Scientific American*, 2005, 293(1).
- [15] Liu Xiaolei, Wang Zheng. The relationship between climate change and the change of agricultural potential productivity. In: Zhang Piyan (ed.). *The Historical Climate Change in China*. Jinan: Shandong Science & Technology Press, 1996. 519-520. [刘啸雷, 王铮. 农业生产潜力改变与气候因子改变的关系推导. 见: 张丕远 主编, 中国历史气候变化. 济南: 山东科学技术出版社, 1996. 519-520.]
- [16] Wang Zheng, Li Huaqun, Kong Xiangde et al. Impact of climate warming on agriculture in China. *Progress in Natural Science*, 2005, 15(6): 706-713. [王铮, 黎华群, 孔祥德 等. 气候变暖对中国农业影响的历史借鉴. *自然科学进展*, 2005, 15(6): 706-713.]
- [17] Ge Jianxiong, Cao Shuji, Wu Songdi. *The History of Migration in China*. Fuzhou: Fujian People's Press, 1993. 149-150. [葛剑雄, 曹树基, 吴松弟. 简明中国移民. 福州: 福建人民出版社, 1993. 149-150.]
- [18] Wu Songdi. The population development in Southern Song Dynasty. *Journal of Chinese Historical Studies*, 2001, (4): 107-124. [吴松弟. 南宋人口的发展过程. *中国史研究*, 2001, (4): 107-124.]
- [19] Chen Shisong. Research on the immigration from Huguang to Sichuan province. *Tianfu New Idea*, 2005, (3): 103-107. [陈世松. "湖广填四川" 研究平议. *天府新论*, 2005, (3): 103-107.]
- [20] Wilson A G, A statistical theory of spatial distribution models, *Transportation Res.*, 1967 1: 253-269.
- [21] Salmi O. Eco-efficiency and industrial symbiosis: A counterfactual analysis of mining community. *Journal of Cleaner Production*, 2007, 15(17): 1696-1705.
- [22] Ge Jianxiong. *The Population Geography in Western Han Dynasty*. Beijing: People's Publishing House, 1986. [葛剑雄. 西汉人口地理. 北京: 人民出版社, 1986.]
- [23] Wang Zheng, Zhang Piyan. The characters of climate change in China during the past 10000 years. In: Zhang Piyan (eds.). *The Trends and Influences of Climate and Sea-Level Changes in China. The Historical Climate Change in China*. Jinan: Shandong Science & Technology Press, 1996. 436. [王铮, 张丕远. 过去 10000 年来中国气温变化的基本特征. 见: 张丕远 主编. 中国气候与海面变化及趋势和影响. 中国历史气候变化. 济南: 山东科学技术出版社, 1996. 436.]
- [24] Zhu Kezhen. Climate change during the past 5000 years in China. *Science in China*, 1973, (2): 168-189. [竺可桢. 中国近五千年来气候变迁的初步研究. *中国科学*, 1973, (2): 168-189.]
- [25] Man Zhimin, Zhang Xiugui. Research on the documental evidence and the characteristics of MWP in the east part of China. In: Zhang L S (eds). *Research on the Past Life-Supporting Environment Change in China (I)*. Beijing: China Ocean Press, 1993. 95-104. [满志敏, 张修桂. 中国东部中世纪温暖期 (MWP) 的历史证据和基本特征的初步研究. 见: 张兰生 主编, 中国生存环境历史演变规律研究(一). 北京: 海洋出版社, 1993. 95-104.]
- [26] Zhang Piyan, Wang Zheng, Liu Xiaolei et al. The climate evolution in China during the past 2000 years. *Science in China (Series B)*, 1994, 24(9): 998-1008. [张丕远, 王铮, 刘啸雷 等. 中国近 2000 年来气候演变的阶段性. *中国科学 (B 辑)*, 1994, 24(9): 998-1008.]
- [27] Li Yuyuan. Research on drought/flood change and dynastic succession in Middle China during the past 5000 years. *Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power (Social Science)*, 1999, 15(4): 37-41. [李裕元. 浅论中原地区近 5000 年来气候的水旱变化规律与中国历史朝代的演替与兴衰. *华北水利水电学院学报*, 1999, 15(4): 37-41.]
- [28] Yuan Zuliang. *Research on the Development of Ancient Population in China*. Zhengzhou: Zhongzhou Ancient Books

- Press, 1994. 285-286; 337-338. [袁祖亮. 中国古代人口史专题研究. 郑州: 中州古籍出版社, 1994. 285-286; 337-338.]
- [29] Hu Huanyong. On population distribution in China. *Acta Geographica Sinica*, 1935, 2(2): 13-21. [胡焕庸. 论中国人口之分布. 地理学报, 1935, 2(2): 13-21.]
- [30] Wang Zheng, Zhang Piyuan, Liu Xiaolei et al. On the ecological sensitive zone in China. *Acta Ecologica Sinica*, 1995, 15(3): 319-326. [王铮, 张丕远, 刘啸雷 等. 中国生态环境过渡的一个重要地带. 生态学报, 1995, 15(3): 319-326.]
- [31] Wang Zheng, Zhang Piyuan, Zhou Qingbo et al. The impact of climate on the society of China during historical times. *Acta Geographica Sinica*, 1996, 51(4): 329-339. [王铮, 张丕远, 周清波 等. 历史气候变化对中国社会发展的影响: 兼论人地关系. 地理学报, 1996, 51(4): 329-339.]
- [32] Zhang Guoxiong. Main direction and periodization of migration in Chinese history. *Journal of Peking University*, 1996, 2: 149-150. [张国雄. 中国历史上移民的主要流向和分期. 北京大学学报, 1996, 2: 98-107.]

## Agent-based Simulation on the Evolution of Population Geography of China during the Past 2000 Years

WU Jing<sup>1</sup>, WANG Zheng<sup>1,2</sup>

(1. East China Normal University, Key Laboratory of Geographical Information Science, Ministry of State Education of China, Shanghai 200062, China;

2. Institute of Policy And Management Science, CAS, Beijing 100080, China;

3. Management College, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

**Abstract:** In order to simulate the evolution of population geography of China during the past 2000 years, an agent-based model is presented in this paper. In the model, population individuals are denoted as agents and geographical environment is presented by cellular automata. Agents can migrate or settle in cellular influenced by historical climatic, agricultural and social conditions which are tightly integrated with population system. With model construction, the formations of population distribution pattern in north vs. south and east vs. west are simulated, as well as the evolution of holistic population geography. Additionally, the driving forces for those population geography developments are investigated respectively. Results are as followings: 1) Even when all the climatic, agricultural and social disturbances are neglected, the correlative coefficient between the simulated population of each province and the realistic data reaches 0.9733. The result shows potential agricultural productivity makes far-reaching influence on China's population geography, determining the essential characteristic of population distribution. 2) Among the scenarios which take account of solo influence, it is found that climatic change made greatest contributions to the evolution of holistic population geography with a contribution coefficient of 0.9869. Therefore historical climate change is proved to be the main driving force for the entire evolution of population geography since 2 A.D. Further, we found that the influence of climate change is multi-phased taking the drastic climate change in 1230-1260 A.D. as a turning point. Before that climate change works faintly on population distribution, but become forceful after that. 3) Based on simulation, it is discovered that the pattern of population geography in north-south China shaped during 910 A.D.'s mainly driven by the social unrest as Anshi turmoil at that time. Because of the turmoil, millions of populations in the north move to the provinces in the south to avoid the war. 4) The pattern of population geography in east-west China is shaped during 1235-1255 A.D. Considereing the temporal social and climatic conditions, we figure the drastic climate change in 1230-1260 A.D. would be the main driving force for the formation of population distribution in east-west China.

**Key words:** agent-based simulation; climate change; historical population; China