

6-9-2021

Bilingual Harmony Micro-simulation Model and Computational Experiment

Shouming Zhang

1. Faculty of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China; ;

Zhiping Wang

1. Faculty of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China; ;

Guihong Bi

2. Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China; ;

Zhenghua Zeng

3. Yueyang City Center Branch, People's Bank of China, Yueyang 414000, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Bilingual Harmony Micro-simulation Model and Computational Experiment

Abstract

Abstract: Under the background of urbanization, the weak connection of social networks has increased, which has challenged the protection of vulnerable languages. *A new social network with remote weak connection is constructed based on the improved modeling method of agent social circle network; in addition to considering the influence of language status and the language population ratio on the language evolution mechanism of different populations, a new mechanism is introduced for the influence of bilinguals on the transition from monolingual to bilingual, and the influence of language attitudes and network connections on language choice behaviors; an improved agent language level and vertical propagation model is presented.* The results of calculation experiments show that in the context of increasing weak connections on social networks, fostering positive language attitudes and improving the influence of bilinguals on the transition from monolinguals to bilinguals are conducive to forming a stable bilingual community.

Keywords

social network, bilingual influence, weak language protection, weak connection, language competition, computational experiment

Recommended Citation

Zhang Shouming, Wang Zhiping, Bi Guihong, Zeng Zhenghua. Bilingual Harmony Micro-simulation Model and Computational Experiment[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(5): 1133-1147.

双语和谐微观仿真模型与计算实验

张寿明¹, 王志萍¹, 毕贵红^{2*}, 曾振华³

(1. 昆明理工大学 信息工程与自动化学院, 云南 昆明 650500; 2. 昆明理工大学 电力工程学院, 云南 昆明 650500;
3. 中国人民银行岳阳市中心支行, 湖南 岳阳 414000)

摘要: 城镇化背景下, 社会网络弱连接关系增多, 对弱势语言保护提出了挑战。基于改进的 agent 社会圈子网络建模方法构建了具有远程弱连接关系的新型社会网络; 不同人群语言演化机制上除考虑语言地位和语言人口比例的影响外, 引入了双语者对单语者向双语者转变的影响力、语言态度和网络连接关系对语言选择行为的影响新机制; 给出了改进的 agent 语言水平和垂直传播模型。计算实验结果表明: 在社会网络弱连接关系增多背景下, 培养积极的语言态度、提高双语者对单语者向双语者转变的影响力等措施有利于形成稳定的全民双语型社区。

关键词: 社会网络; 双语者影响力; 弱势语言保护; 弱连接; 语言竞争; 计算实验

中图分类号: TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X (2021) 05-1133-15

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.20-0042

Bilingual Harmony Micro-simulation Model and Computational Experiment

Zhang Shouming¹, Wang Zhiping¹, Bi Guihong^{2*}, Zeng Zhenghua³

(1. Faculty of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;
2. Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;
3. Yueyang City Center Branch, People's Bank of China, Yueyang 414000, China)

Abstract: Under the background of urbanization, the weak connection of social networks has increased, which has challenged the protection of vulnerable languages. A new social network with remote weak connection is constructed based on the improved modeling method of agent social circle network; in addition to considering the influence of language status and the language population ratio on the language evolution mechanism of different populations, a new mechanism is introduced for the influence of bilinguals on the transition from monolingual to bilingual, and the influence of language attitudes and network connections on language choice behaviors; an improved agent language level and vertical propagation model is presented. The results of calculation experiments show that in the context of increasing weak connections on social networks, fostering positive language attitudes and improving the influence of bilinguals on the transition from monolinguals to bilinguals are conducive to forming a stable bilingual community.

Keywords: social network; bilingual influence; weak language protection; weak connection; language competition; computational experiment

引言

目前, 96%的人口使用大约 4%的语言, 而 25%

的语言使用者不到 1 000 人^[1]。此外, 语言学家估计, 除非目前的趋势发生变化, 否则到本世纪末, 目前所说的约 6 000 种语言中有 90%可能会面临极

收稿日期: 2020-01-14 修回日期: 2020-03-20

基金项目: 国家自然科学基金(61364022); 国家社科基金重大项目(17ZDA309)

第一作者: 张寿明(1966-), 男, 白族, 博士, 教授, 研究方向为复杂工业过程控制。E-mail: zsmingxm@sina.com

通讯作者: 毕贵红(1968-), 男, 彝族, 博士, 教授, 研究方向为社会与经济系统仿真。E-mail: km_bgh@163.com

大的濒危甚至消亡^[2]。语言濒危是一种全球现象，但是却值得所有人关注。保护弱势语言是为了保护多样性的民族文化，同时也是为了保障各民族成员的平等权利。任何一种语言的消失必将导致独特文化、历史以及生态知识不可挽回的损失^[3]，因此研究弱势语言的保护机制迫在眉睫。

通过构建语言演化的模型来研究语言濒危和调控的机理是目前常用的方法，目前研究语言演化问题计算模型主要有宏观建模和微观建模 2 种方法。Abrams 等^[4]首先提出基于微分方程的系统动力学方程(以下简称为 AS 模型)描述 2 类人群 2 种语言竞争与演化问题的宏观模型。Minett 等^[5]通过引入双语者人群将 AS 模型的 2 类单语者人群竞争模型推广至 3 类人群情形。2 种模型的语言竞争模型的动力学分析认为 2 种语言共存不是一种系统演化的稳定状态，系统演化的最终稳定状态为一种语言将消亡，另一种语言胜出。宏观语言竞争模型虽然能给出与语言竞争实际态势一致的定量结果，但是不能很好地描述语言交流网络、语言政策与个体语言决策行为之间相互作用推动系统演化实现语言竞争宏观涌现的微观机制。所以，Minett 等^[5]进一步在推广 AS 宏观模型的基础上给出了考虑双语者和社会网络的微观模型(以下简称为 MWAS 模型)，研究结果认为在无政策调控下该系统的动力学特性与 AS 模型结果相同，通过对系统演化过程中的语言地位进行动态调控可以使系统的不稳定点改变为稳定点，实现语言共存。现实的语言环境与理论模型比较存在复杂性，弱势语言在一些特殊地理环境和社会环境中却能得到较好的保持。基于此，Patriarca 等^[6-7]在 AS 模型基础上考虑空间维数双语竞争的动力学特性，基于反应—扩散模型可以将语言竞争模型和空间因素结合起来，空间变量用于描述局部文化和地理空间影响的不一致性。研究结果表明，地理缓冲和文化缓冲能导致在一些区域双语共存。

之前的研究中无论是宏观模型还是微观模型，

人们主要考虑语言交流网络不同语言的人口比例、语言地位和家庭语言传承对语言选择使用的影响。认为人们更容易倾向于选择强势语言和语言人口比例大的语言学习。政策研究的重点是通过弱势语言地位调控实现双语人群比例的提高，进而通过双语来保护弱势语言。一些宏观模型中考虑了地理空间和文化空间的缓冲因素，认为地理和文化隔离有助于弱势语言保存。近来的研究表明，影响语言竞争的主要因素是语势(即通常所指的语言地位)，一种语言的语势由该语言的使用人口数、词汇量和拥有的文献数量决定^[8]，所以语势或语言地位很难在短期内改变，不适合作为可变的调控参数。而随着城镇化和通讯的便利，地理空间的缓冲作用也将受到削弱。所以进一步探寻保持语言和谐机制和政策调控措施势在必行。

综上所述，近年来人们在认识语言竞争和和谐的机制上有了更加全面的认识，语言竞争微观仿真模型可望在以下方面加以改进完善。① 双语人群具有凝聚力。Heinsalu 等^[9]认为，一种单语者演变为双语者，不仅受到另一种人群语言地位和语言密度的影响，也要受到人群中双语者的影响，双语者对于单语者向双语者转变有影响力，构建双语价值型社会有利于发挥双语者人群的凝聚力。目前微观模型里面尽管引入了双语者人群，但是对双语者在语言演化中的角色和作用没有合理表达。现有微观模型在语言竞争机制上存在不足，需要完善。② 语言交流社会网络和语言态度相互作用是语言竞争与演化态势发展规律的内部重要机制。社会语言学研究表明，语言态度是指人们在语言生活中对待某种语言的基本意见、主张以及由此带来的语言倾向和言语行为^[10]。语言态度与语言行为选择正相关^[11]，其可以通过公众教育等措施来加以改变，实际的语言使用演化情况调研结果也支持相同的观点^[12]。所以本文认为语言态度是个体语言选择建模时需要加以考虑的重要因素，而且它可以作为政策调控参数分析其调控作用。个体语言的使

用和选择还与个体所处的社会网络密切相关, 语言学家徐大明指出^[13]: 如果一个网络主要是由强关系网构织而成的, 那么它将会支持弱势语言而抵制语言转移的官方压力, 但当这些网络关系日渐衰弱的时候, 语言转移就有可能发生。实际研究表明, 交际网络稳定和凝聚力强的社区有利于维持语言生态^[14]。而之前的微观仿真模型主要考虑了强社会关系网络^[5,15-16], 没有考虑到当今社会快速城镇化引起人们社会关系从强社会关系为主到弱社会关系增强的新型社会网络及演变的现实。通过社会网络连接不同民族不对等语势的语言实现接触和碰撞, 社会人口流动引起社会网络的强弱关系改变, 弱社会关系有利于个体语言选择和使用强势通用语言, 语言选择的偏好改变网络中个体的语言态度, 个体母语态度的弱化决定网络中语言的选择行为更有利于强势语言。所以构建语言竞争与保护社会仿真微观模型, 一方面需合理描述双语竞争中 3 种人群的角色作用, 特别是双语者的纽带作用; 另一方面应该合理描述社会网络、个体语言态度以及个体语言选择使用三者之间的协同演化机制, 才能深入认识语言濒危与保护问题。

1 语言竞争传播网络

1.1 社会圈子网络生成原理

Hamill 等^[17]提出一种基于 agent 社会圈子网络理论来构建动态社会网络的方法, 由于其在构建动态社会网络方面具有的优势, 已经在语言竞争社会仿真建模方面得到应用^[18]。网络中的 agent 赋予不同的社会半径, 以个体 agent 在二维平面的位置为圆心, 以其社会半径长度构成的圆作为其社会圈子。当 2 个 agent 中心坐标点的连线的长度 Q 小于等于连线两端 agent 较小的社会半径 r 时, 表示 2 个个体 agent 都处于对方社会圈子内, 互相认识, agent 间将建立连接关系, 否则, 不建立连接关系。如图 1(a)中 $Q > r$, 个体不会建立连接关系, 图 1(b)中 $Q < r$, 两者建立连接关系。如果个体的社会半径

增加, 则其在二维平面上的社会圈子越大, 可以和更多的个体有连接关系, 如图 1(c)所示。

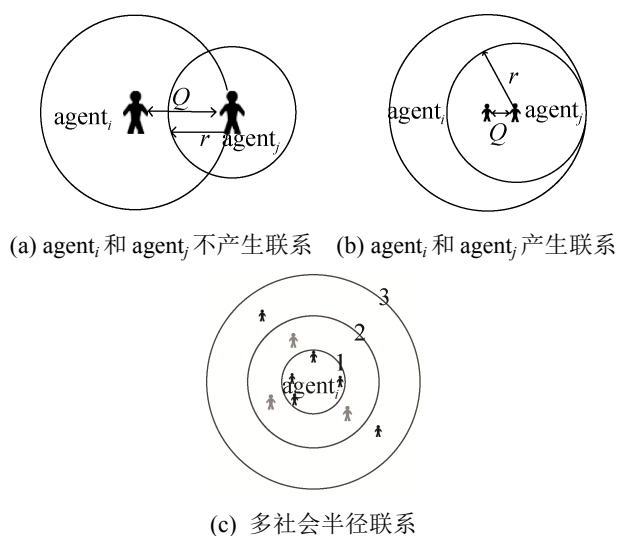


图 1 社会圈子网络生成原理

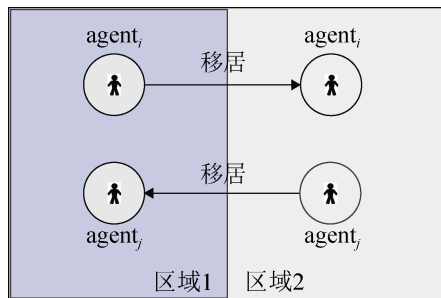
Fig. 1 Social circle network generation principle

1.2 远程跨区域社会网络

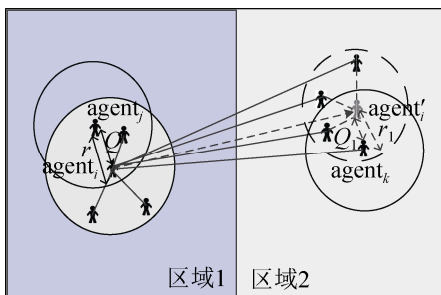
为了描述人们在不同区域间跨区域的返回和不返回式远距离流动及远程通讯联系产生的社会网络。社会圈子网络做出如下 2 方面改进: ① 远距离跨区域移居。图 2(a)中, agent_i/agent_j 从一个区域长距离移动到另一个区域, 移动距离超过自身社会半径, 会断开原有建立的个体网络结构, 在新的区域按照社会圈子理论重新生成社会网络, 导致 agent_i/agent_j 的个体以及整体网络结构改变; ② 远距离返回式流动和远程通讯连接。如图 2(b)所示, 有一定比例的区域 1 人口除了和自己社会半径内的人产生连接关系, 还会与区域 2 一定社会半径范围内的所有个体产生连接关系, 相当于区域 1 中个体在区域 2 中的一个虚拟镜像^[19], 或者相反。可以通过引入 agent 虚拟镜像的概念, 结合社会圈子理论的方法来实现这种连接。具体方法如下:

agent_i 是属于区域 1 中的一个个体, agent_i' 是 agent_i 在区域 2 的虚拟镜像, 它拥有新的社会半径, 利用 1.1 节的社会网络圈子方法, 寻找与其具有连接关系的个体, 将这些个体与区域 1 中原 agent_i 之

间通过边连接,便得到 agent_i 在区域2中的远程社会连接关系。



(a) 远距离跨区域移居



(b) 远距离返回式流动和远程通讯连接

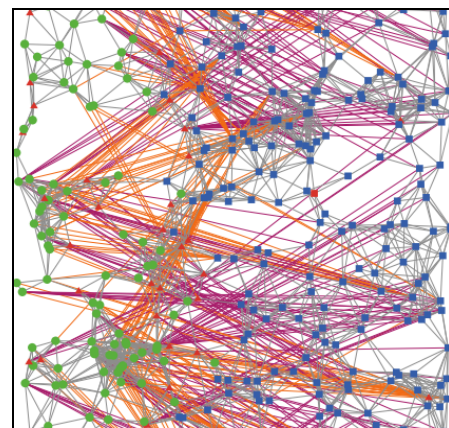
图2 远程跨区域社会网络

Fig. 2 Remote cross-regional social network

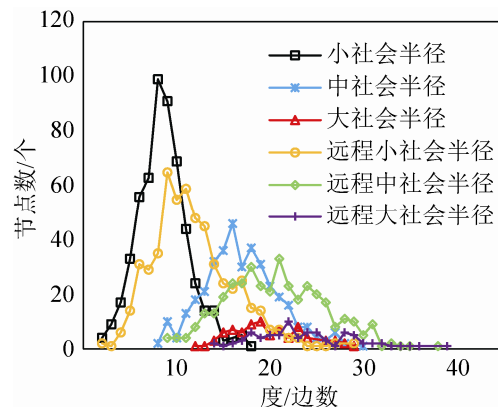
1.3 具有弱连接关系的社会网络参数度量验证

依据上述改进的社会圈子网络生成模型,如图3(a)所示,圆形节点表示单语者 x , 正方形节点表示单语者 y , 三角形节点代表双语者 z , “—”代表连线两端的个体建立连接关系。拥有3种不同社会半径的 agent 度分布整体都呈现出泊松性,如图3(b)所示。现实社会中,由于人的交际范围不同,所以个体的社会圈子大小也因人而异,只有极少数人的社会圈子会很大。有远程连接的社会圈子网络度分布比没有远程连接的社会圈子网络度分布高度更低,整体往右,说明有远程连接的节点平均度更大,即与其相连的邻居节点数更多,个体的平均网络规模增大,度相对较低个体的数量减少。聚类系数分布如图3(c)所示,整体网络个体聚类系数平均值在0.569左右,具有较高的聚类系数,加入远程连接后的聚类系数分布曲线整体往左偏移,平均值聚类

系数值为0.471。聚类系数是一个人的任意2个朋友之间互为朋友可能性的定量描述,是社会网络关系强弱的一个重要属性。加入远程连接的网络比没有加入远程连接的网络平均聚类系数要低,相当于弱化了朋友关系的强连接,强化了弱连接。计算出网络没有加入远程连接和加入远程连接后的 Pearson 系数分别为0.382和0.269,具有度度正相关特点,度度相关虽然仍为正相关,但相关度减小,表示弱连接增强。无远程连接网络的平均路径为5.97,符合社会网络平均路径短,即六度分离原则,反映了实际人际关系社会网络的“小世界”特性,加入远程连接的网络平均路径为3.14,大大缩短了路径。无远程连接网络的网络密度为1.258%,具有密度低的特点,加入远程连接,网络密度提高1.599%,但总体而言还是很低,满足社会网络低密度特征。



(a) 社会圈子网络



(b) 度分布

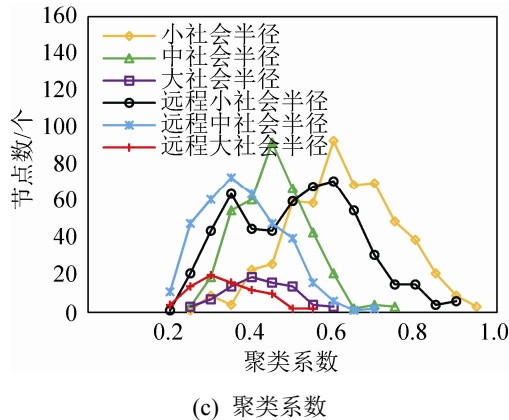


图 3 社会圈子网络及度量参数

Fig. 3 Social circle network and metric parameters

2 新型 agent 微观模型

我们在 MWAS 微观模型中引入宏观 EMMAS 模型的双语影响力和语言人群的语言态度作用机制来构建具有远程弱连接关系的新型社会网络上 agent 的语言水平和垂直传播模型。

2.1 水平传播模型

语言网络中, 同辈不同 agent 个体之间通过非接触(如通信、网络和媒体等)联系或接触交流的方式来相互学习新语言而变成双语者, 当然也可以保持已掌握的语言不变。语言的水平传播规则可以反映这一过程, 其语言状态的演变, 取决于该 agent 对语言的学习态度、语言的地位等内在因素, 同时也受所处本地和远程社会网络中与其连接的其他 agent 的语言状态等外部因素对它的综合性影响, 如图 4 所示。考虑双语者的三语人群情形下, 网络中个体的语言水平传播状态迁移路径如图 5 所示。

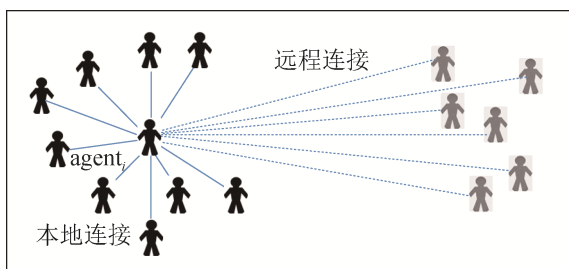


图 4 一个 agent 的社会网络连接图

Fig. 4 A social circle network of agent

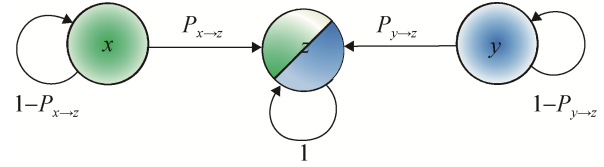


图 5 语言水平传播模型

Fig. 5 Language horizontal transmission model

具体水平传播规则如下: ① 语言网络中的同辈个体只掌握一种语言 x , 后来受到与网络中与其连接同辈 y 单语者和 z 双语者的影响, 最终以 $P_{x→z}$ 的概率(式 1)转换为双语者 z , 即 $x → z$; 以 $1 - P_{x→z}$ 的概率保持单语状态。其中我们规定网络上与该 x 单语者个体有本地连接关系的双语者 z 对该个体学习 y 语言的影响力由权重 1 表征, 网络上与该 x 单语者个体有远程连接关系的双语者 z 对该个体学习 y 语言的影响力由权重 r 表征。② 同样, 语言网络中的同辈个体只掌握一种语言 y , 后来受到网络中与其连接同辈 x 单语者和 z 双语者的影响, 最终以 $P_{y→z}$ 的概率(式(3))转换为双语者 z , 即 $y → z$; 以 $1 - P_{y→z}$ 的概率(式(4))保持单语状态。③ 网络中的个体如果已经通过学习掌握了双语, 成为双语者 z , 那么在接下来的演化过程中我们认为该个体不会再失去其中任何一种语言, 保持双语者状态不变, 即 $P_{z→z} = 1$, 如式(5)所示。

$$P_{x→z} = c_h \cdot P_{xy} \cdot S_y \cdot \frac{n_{ly} + r \cdot n_{my} + k \cdot (n_{lz} + r \cdot n_{mz})}{n_l + r \cdot n_m} \quad (1)$$

$$P_{x→x} = 1 - P_{x→z} \quad (2)$$

$$P_{y→z} = c_h \cdot P_{yx} \cdot S_x \cdot \frac{n_{lx} + r \cdot n_{mx} + l \cdot (n_{ly} + r \cdot n_{my})}{n_l + r \cdot n_m} \quad (3)$$

$$P_{y→y} = 1 - P_{y→z} \quad (4)$$

$$P_{z→z} = 1 \quad (5)$$

式中: c_h 为水平传播概率前系数; P_{xy} 为单语者 x 对学习 y 语言的态度; P_{yx} 为单语者 y 对学习 x 语言的态度, 取值范围为[0,1], 态度越高, 学习另一种语言的积极性越高, 相反容易产生排斥学习其他语言的行为; S_x 为单语 x 的语言地位; S_y 为单语 y 的语言地位; n_l 为 agent 个体社会半径内所有个体

的总数量; n_m 为与其具有远程连接关系的所有个体的总数量; n_{lx} , n_{ly} 和 n_{lz} 分别为 agent 个体社会半径内单语者 x 、单语者 y 、双语者 z 的数量, n_{mx} , n_{my} 和 n_{mz} 分别为与其具有远程连接关系个体中单语者 x 、单语者 y 、双语者 z 的数量; k , l 分别为双语者 z 对单语者 x 、单语者 y 变为双语者 z 的影响力, 取值范围为[0,1], 值越大表示双语者个体的吸引力和影响力越大; r 为远程连接权重。

2.2 垂直传播模型

社会人口数量的动态变化可以通过人口的出生和死亡来体现, 此过程需要考虑父辈语言的遗传以及子辈对语言的继承, 语言的垂直传播规则可以反映这一过程, 如图6所示。

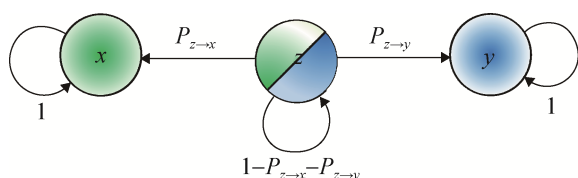


图6 语言垂直传播模型

Fig. 6 Language vertical transmission model

MWAS 模型中子代传承父辈的语言规则为: 父辈为单语者 x (或 y), 则子代也只能传承单语 x (或 y); 当父辈为双语者 z 时, 子代传承 x (或 y) 单语的概率受到 x (或 y) 的语言地位以及网络邻域中单语 x (或 y) 者比例的影响。我们基于新的语言竞争机制, 增加单语者对学习双语的态度、远程连接类型的影响因素给出改进的垂直传播公式, 如式(6)~(10)所示。

(1) 当父辈为单语者时, 子代直接继承父辈的单语, 如式(6)~(7)所示。

(2) 父辈为双语者, 如果满足概率 $P_{z \rightarrow x}$ 时, 子代仅继承单语 x ; 如果满足概率 $P_{z \rightarrow y}$ 时, 子代仅继承单语 y , 如式(8)~(9)所示, 式中的 P_a 代表单语者对学习双语的态度, $(1 - P_a)$ 表示对双语学习的不积极态度。公式表明, 双语遗传单语与该种语言的语言地位、人口密度和对双语的不积极态度成正比。

(3) 父辈为双语者, 在满足概率 $P_{z \rightarrow z}$ 条件下, 子代继承父辈的双语特性, 如式(10)所示, 表明人们对学习双语的态度越积极, 个人社会网络邻域双语人群越多, 人们传承双语的概率 $P_{z \rightarrow z}$ 越大。

$$P_{x \rightarrow x} = 1 \quad (6)$$

$$P_{y \rightarrow y} = 1 \quad (7)$$

$$P_{z \rightarrow x} = c_v \cdot (1 - P_a) \cdot S_x \cdot \frac{n_{lx} + r \cdot n_{mx}}{n_x + r \cdot n_m} \quad (8)$$

$$P_{z \rightarrow y} = c_v \cdot (1 - P_a) \cdot S_y \cdot \frac{n_{ly} + r \cdot n_{my}}{n_y + r \cdot n_m} \quad (9)$$

$$P_{z \rightarrow z} = 1 - P_{z \rightarrow x} - P_{z \rightarrow y} \quad (10)$$

式(6)~(10)中: c_v 为垂直传播概率前系数; P_a 为对学习双语的态度, 取值范围为[0,1], 取值越大代表人们对双语的态度越积极; 其他参数的含义同水平传播。

2.3 Agent 交互及个体行为模型

基于复杂 agent 网络的人工社会模型包括人口、社会网络和个体 agent 及其相互关联关系^[20]。人口特征决定了个体在人工社会中可能有的关系类型和范围。agent 的社会行为模型在仿真中驱动和控制 agent 在人工社会中的迁移和交互行为, 这些行为可能引发 agent 某些社会特征的值的变化。同时 agent 之间的交互受到个体社会关系的制约。文献[20]进一步认为, 个体之间的交互分为两种模式, 一种是空间随机交互模式, 一种是基于社会关系的交互模式。本文的模型为基于社会关系的交互模式, 个体社会关系包括强社会关系和弱社会关系两类, 个体 agent 根据社会圈子网络建模及其改进方法构建和维护。

个体交互和行为模型如图7所示。管理 agent 主要负责初始化人口信息和个体社会特征信息, 实施语言调控政策以改变 agent 的语言学习行为。复杂 agent 网络负责统计各类 agent 语言人口比例, 并反馈给管理 agent 分析语言演化规律。agent 的个体行为影响 agent 的内部状态和个体社会关系, 所有 agent 的内部状态改变涌现出语言

竞争人群演化态势, 个体 agent 社会关系的组合为复杂社会网络。个体 agent 的行为模型如下:

① 如果个体 agent 是新生个体, 则利用改进的社会圈子方法构建自己的社会关系, 个体社会关系的构建影响复杂 agent 网络的整体结构。如果个体 agent 是已存在的个体, 则保持自己的社会关系。② 个体 agent 从构建的复杂 agent 网络中获得自己的社会关系及其类型, 通过与社会关系中的个体交互统计不同语言类型的 agent 比例, 与管理 agent 交互获得语言调控政策参数。在此基础上新生个体利用 2.2 节中的垂直传播模型实现

语言状态的继承, 利用 2.1 节的水平传播模型实现语言状态的迁移。③ 个体如果满足移居条件, 则个体移动到新的位置, 根据社会圈子改进方法通过断开和重建来更新社会关系, 同样个体社会关系的改变影响整体 agent 网络的结构。如果个体不满足移居条件在其社会关系保持不变。④ 个体 agent 如果满足死亡条件, 则个体从系统中被删除, 断开个体所有社会关系, 同样会影响整体 agent 网络的结构。否则, 个体 agent 及其社会关系保持不变。

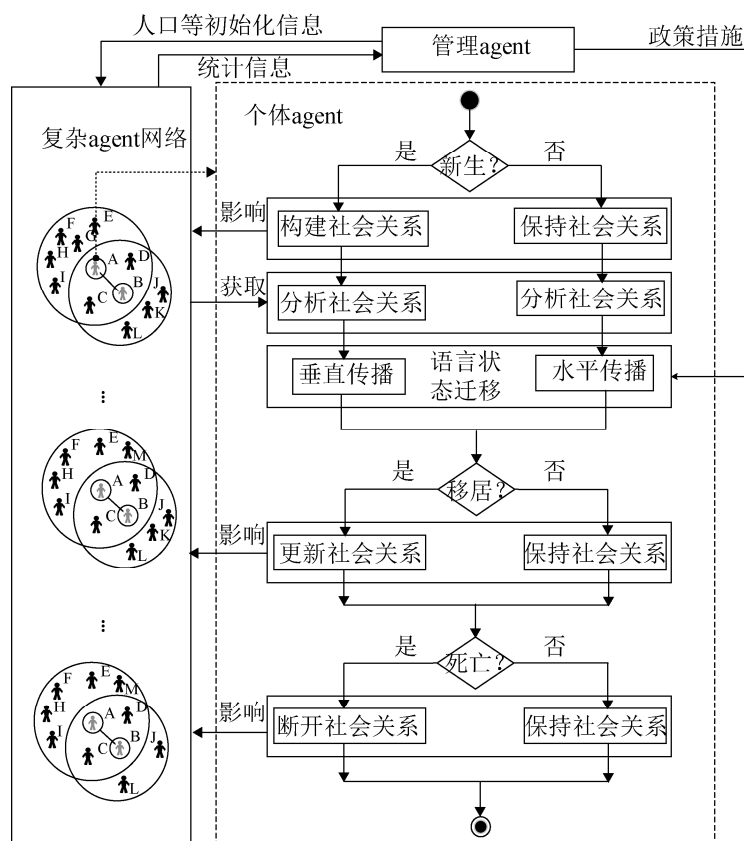


图 7 agent 的行为和交互关系模型

Fig. 7 Behavior and interaction model of agent

3 计算实验分析

本模型研究了在聚居条件下: ① 改变参数 k 和 l 值的大小, 利用方向图研究系统的动力学特性; ② 设置语言态度为单一可改变的参数, 通过计算实验作出系统的状态空间图, 分析语言共存的参数

区间。③ 在社会网络弱连接关系增多背景下, 如果社区出现了弱势语言持续衰变的情形, 当社区中弱势语言人群比例低于警戒线时, 提高双语作用因素和提高语言态度值对弱势语言恢复的影响。该网络模型以 NetLogo^[21]为平台, 主要参数的初值借鉴了文献[5,9,17-18]中的设定, 如表 1 所示。

表 1 模型主要参数的初值

Tab. 1 Initial value of the main parameters of the model

参数	初始值	描述
S_x	0.4	x 语言地位
S_y	0.6	y 语言地位
$nofArea1$	400	区域 1 初始 agent 的数量
$nofArea2$	600	区域 2 初始 agent 的数量
cc	0.4	区域 1 所占整个区域的比例
P_{xy}	0.65	单语者 x 对学习 y 语言的态度
P_{yx}	0.45	单语者 y 对学习 x 语言的态度
P_a	0.4	学习双语的态度
k	0.15	双语者 z 对单语者 x 的影响力
l	0.45	双语者 z 对单语者 y 的影响力
c_h	1	水平传播概率前系数
c_v	0.2	垂直传播概率前系数
r	0.1	远程连接权重
$longdistance$	10	远程连接时的社会半径
$Timelonglinks$	1	每隔多少步有一次远程连接
$longlinkpeople1$	20%	区域 1 中有远程连接(到区域 2)的 agent 比例
$longlinkpeople2$	10%	区域 2 中有远程连接(到区域 1)的 agent 比例
$crossmovement1$	6%	区域 1 中每个 agent 长距离移居区域 2 的概率
$crossmovement2$	4%	区域 2 中每个 agent 长距离移居区域 1 的概率

3.1 系统演化状态与轨迹

在文献[4,15]中,系统演化的结果有稳定和 unstable 2 种均衡点,不稳定点会随机按一定的概率滑向稳定点,弱势语言最终会消亡,系统不能达到共存状态,模型用微分方程构建,其动力学特性由系统的方向图来描述。在文献[5]中,通过干预机制调控语言地位可以使系统的不稳点变为稳定点,强势语言和弱势语言在系统可以达到共存状态。构建的语言竞争微观模型利用轨迹图分析系统解的空间状态,认为轨迹图与方向图高度近似,可以用轨迹图代替方向图分析系统的演化特征。语言竞争演化系统中以弱势语言单语者比例 n_x 、强势语言单语者比例 n_y 、双语者的比例 n_z 为系统演化的考察变量,来分析系统长期演化的动力学特性。在此用系统的轨迹图来描述系统的动力学机制,由于系统中 $n_z=1-n_x-n_y$,系统的轨迹图是指系统中 x, y 语言人口比例(n_x, n_y)随时间增长演化的轨迹,如图 8 所示;轨迹图是在二维坐标中从起点到终点每个点对应系统时序演化的一个时刻,横坐标为 n_x ,纵坐标

为 n_y ,坐标系中的每一点表示系统在该步长时刻对应的人口比例。在设置的居住格局和系统的主要仿真参数设置如表 1 中初始条件下,经过大量实验表明,系统最长经过 1 700 步长时间演化,系统进入稳定状态,即系统演化状态不再发生改变。所以我们认为 $t=2\ 000$ 可以近似看成系统在 $t=\infty$ 时的演化状态。系统演化最终状态存在稳定均衡点和 unstable 均衡点 2 种。稳定均衡点是指系统在相同初始提交件下系统的演化终点状态只有 1 种;不稳定均衡点,即在相同初始条件下,有不同的最终演化结果,如图 8 所示为同一条件下有 3 种不同的演化终点状态。图 8(a)和 8(b)为第 1 种演化结果,终点状态为 3 种语言人口共存情形(x, y, z),图 8(a)是系统 3 类人群随时间演化的时序图,图 8(b)是对应的轨迹图。图 8(c)和 8(d)表示系统在相同初始条件下的第 2 类演化结果,系统最终只剩下单语 y ,通过轨迹图 8(d)可以看到系统最终收敛到均衡点(0,1,0)。图 8(e)和 8(f)表示系统在相同初始条件下的第 3 类演化结果,系统最终只剩下单语 x ,通过轨迹图 8(f)可以看到系统最终收敛到均衡点(1,0,0)。

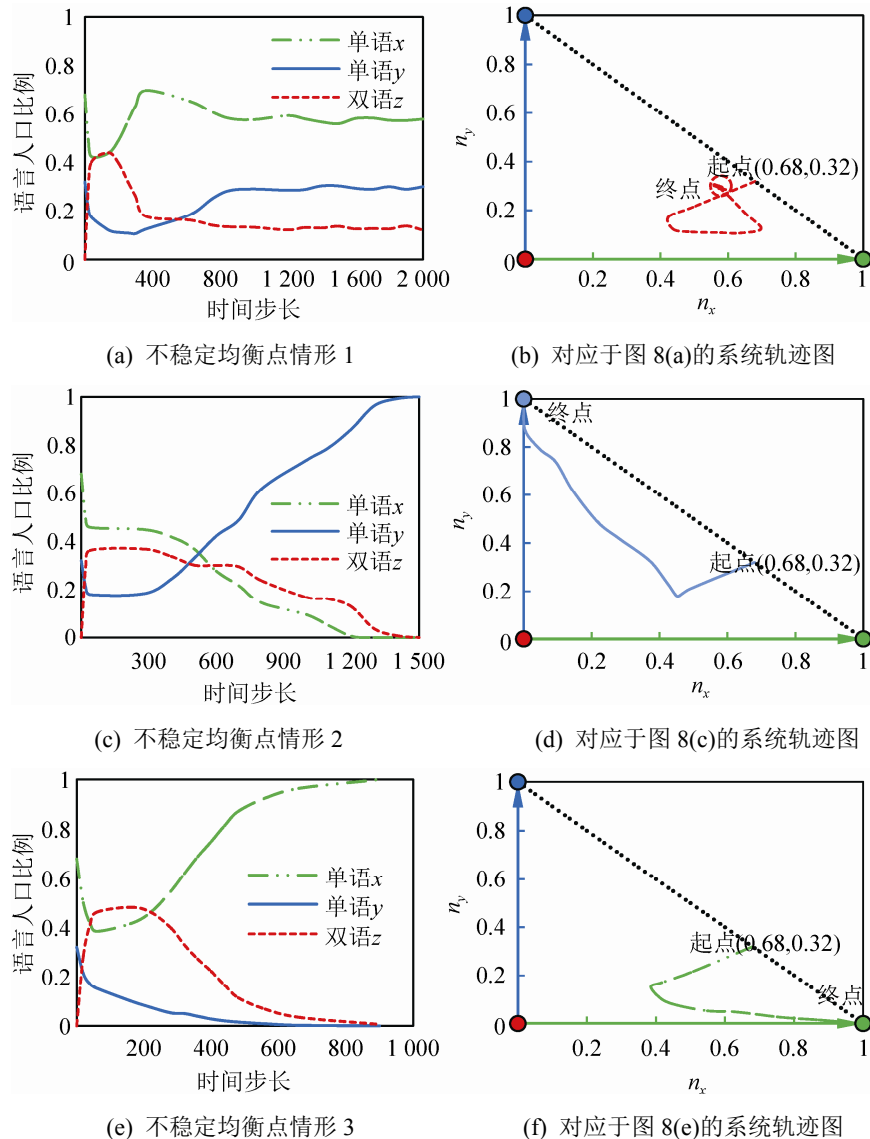


图 8 系统在不稳定均衡点处的演化趋势

Fig. 8 Evolution trend of the system at unstable equilibrium points

3.2 双语影响力改变对系统演化的影响

双语是连接 2 种单语的桥梁, 是 2 种语言的有效代表, 被单语者视为另一种语言的发言者。双语者对单语者进一步转化为双语者具有吸引力和影响力, 对构建双语价值社会具有重要影响, 即 k 和 l 的值越大表示双语者个体的吸引力和影响力越大^[9]。

聚居初始人群比例的设置要实现区域内单语者 x 和单语者 y 独立分布, 分配区域 1 内的 agents 只会弱势语言 x , 区域 2 内的 agents 只会强势语言

y 。 cc 代表区域 1 所占整个二维空间网格面积的比例, 取值在 0~1 之间。区域面积的大小和人口比例对应, 保持区域 1 和区域 2 的人口密度相同。探讨当初始人群比例变化系统的最终演化状态。系统的主要仿真参数设置如下: 弱势语言 x 的语言地位为 $S_x=0.4$, 强势语言 y 的语言地位为 $S_y=0.6$, 单语者 x 对学习强势语言的语言态度为 $P_{xy}=0.65$, 单语者 y 对学习弱势语言的语言态度为 $P_{yx}=0.45$, 单语者对学习双语的态度为 $P_a=0.4$ 。以下将以双语影响力(k 和 l)为变化参数分析聚居条件下系统的演化趋势, 实验表明系统演化的时间步超过 4 000 步后, 系统

的演化状态不再改变, 所以我们以系统 4 000 步时系统的演化状态, 表征系统演化终点状态。

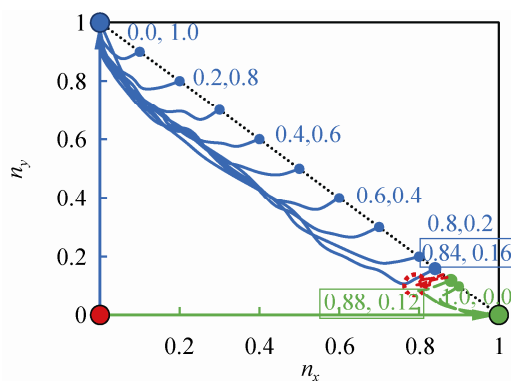
(1) 当不考虑双语者对单语者 x, y 的影响情况下, 即 $k=0, l=0$, 如图 9(a)所示, 系统的最终状态取决于单语者 x, y 的初始人口比例, 当单语者 x 的初始人口比例小于等于 0.84 时, 系统最终收敛到 $(0,1,0)$, 系统中只剩强势语言 y 。在系统演化过程中, 强势语言会从 2 个区域的分界处一层层向弱势语言渗透, 弱势语言会在短时间内以双语的形式存在, 很快就会被同化为强势语言。当单语者 x 的初始人口比例范围在 0.84~0.88 时, 系统最终收敛到 (x,y,z) , 是一种 3 语共存状态, 主要以弱势语言为主, 少量强势语言和双语共存, 是一种不稳定均衡点。当单语者 x 的初始人口比例高于 0.88 时, 系统最终收敛到 $(1,0,0)$, 只剩弱势语言 x 。尽管弱势语言的语言地位更低, 但当初始人口比例很高的情形下, 其可以得到很好的保持。即弱势语言 x 在人口比例占优势的情况下, 可以弥补语言地位上的差异保留下来。

(2) 当考虑双语者对单语者的影响均较小的情况下, 即 $k=0.15, l=0.4$, 如图 9(b)所示, 系统的最终状态取决于单语者 x, y 的初始比例, 当单语者 x 的初始人口比例小于等于 0.55 时, 系统最终收敛到 $(0,1,0)$, 系统中只剩强势语言 y 。当单语者 x 的初始人口比例范围在 0.55~0.6 时, 系统最终演化状态是一种 3 语共存状态, 和图 9(a)相比较, 系统最终平衡状态的位置发生了改变, 共存区间扩大。人口初始比例共存区间扩大了一点, 但仍然很小。

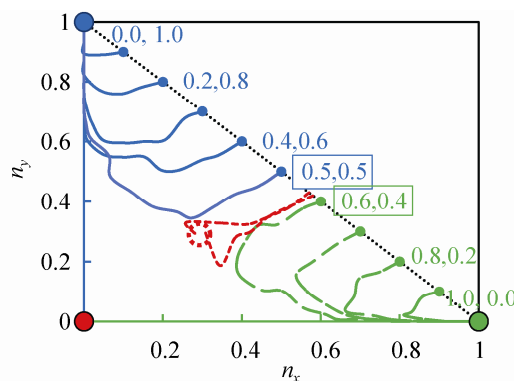
(3) 当考虑双语者对单语者 x 的影响力小, 对单语者 y 的影响力比较大的情况下, 即 $k=0.15, l=0.85$, 如图 9(c)所示, 无论单语者 x 和单语者 y 的初始人口比例多少, 系统最终都收敛到 $(1,0,0)$, 只剩弱势语言 x , 并且随着单语者 x 的初始比例越高, 到达最终的平衡态所需要的时间就会越短。所以, 在此情形下双语者对强势语言者转化为双语者的影响力在系统演化中起了决定性作用, 系统中双语者快速增加, 但是双语者双语稳定性不强, 在遗传给子代时转变为单语 x , 系统演化的终点只剩下 x 单语。

(4) 当考虑双语者对单语者 x 的影响力大, 对单语者 y 的影响力比较小的情况下, 即 $k=0.75, l=0.25$, 如图 9(d)所示, 无论单语者 x 和单语者 y 的初始人口比例多少, 系统最终都收敛到 $(0,1,0)$, 只剩强势语言 y , 在演化的过程中单语者 x 会先全变成双语, 再慢慢遗忘掉自己的母语, 最终只掌握强势语言 y 。

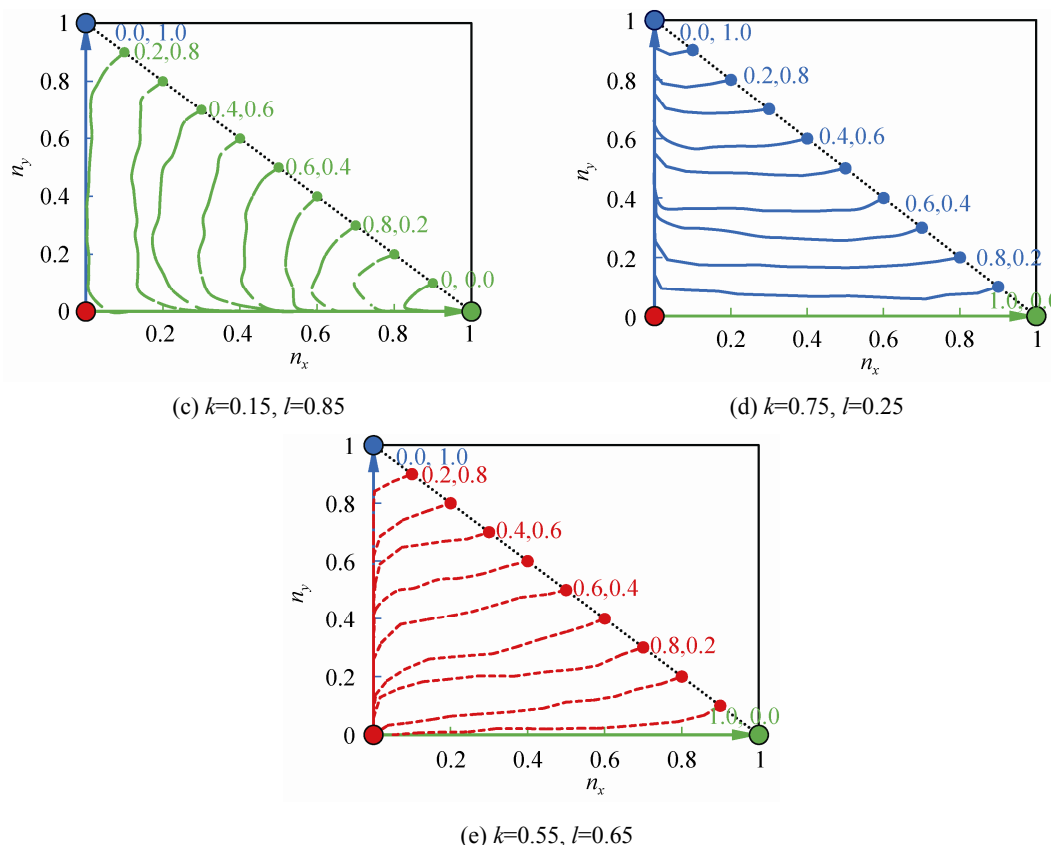
(5) 当考虑双语者对单语者 x, y 的影响都比较大的情况下, 即 $k=0.55, l=0.65$, 如图 9(e)所示, 无论单语者 x 和单语者 y 的初始人口比例多少, 系统最终都收敛到 $(0,0,1)$, 系统最终是一个全双语状态的稳定均衡点。双语者对 2 种单语向双语转变都有较强的吸引力, 单语者向双语者转变的概率增加, 尽管双语稳定性较弱, 但是整个系统仍以向双语转变为主流, 系统演化的终点稳定在全民双语的稳定态, 双语凝集力引导系统向双语态演化起到了主导作用。



(a) $k=0, l=0$



(b) $k=0.15, l=0.4$

图 9 聚居条件下 k, l 变化对系统演化的影响Fig. 9 Effect of k and l changes on system evolution under population conditions

3.3 语言态度改变对系统最终演化状态的影响

语言态度是影响个人语言行为选择的重要因素, 改变其大小可模拟人们学习某种语言的积极性程度对语言竞争传播的影响。设置语言态度为单一可改变的参数, 随着语言态度从 0~1 变化, 做出 x, y, z 三种语言人口在系统演化过程中的最终比例的状态空间图, 寻找不同 k, l 情形下系统语言共存状态对应的语言态度参数值区间, 探讨语言态度参数区间与系统最终演化状态之间的对应关系。

3.3.1 单语者 x 学习 y 语言的态度改变对系统最终演化状态的影响

单语者 x 学习 y 语言的态度变化影响讲弱势语言的群体对学习强势语言的积极性, 影响双语人群的比例。在这里我们设置 P_{xy} 为单一可变参数, P_{xy} 表示单语者 x 学习 y 语言的态度, 系统主要的仿真

参数设置如下: $S_x=0.4, S_y=0.6, n_x=450, n_y=550, P_{yx}=0.45, P_a=0.4$, 通过计算实验研究在聚居 4 000 步的条件下系统语言共存状态对应的 P_{xy} 参数区间, 以下将以不同 k, l 为情形来进行分析。

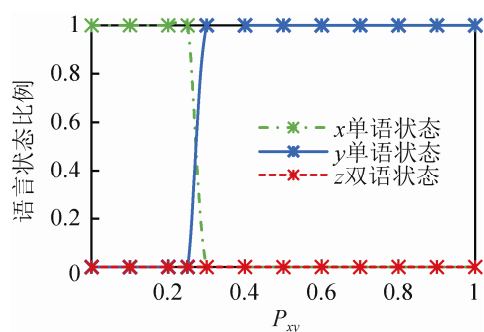
(1) 当不考虑双语者对单语者 x, y 的影响情况下, 即 $k=0, l=0$, 如图 10(a)所示, 当 $0 \leq P_{xy} \leq 0.25$ 时, 单语者 x 学习 y 语言的积极性很低, 几乎不学 y 语言; 单语者 y 学习 x 语言的积极性较高, 会学习 x 语言变成双语者 z , 由于对学习双语的态度低, 单语者 y 会逐渐遗忘掉自己的语言, 系统最终是弱势语言 x 人口会占据全部人口。当 $0.25 < P_{xy} < 0.3$ 时, 随着单语者 x 学习 y 语言的积极性提高, 有一部分单语者 x 会在短时间内变成双语者 z , 由于对学习双语的态度低, 双语在系统中存在的时间短, 系统最终是单语 x 和单语 y 的共存态。当 $P_{xy} \geq 0.3$ 时, 系统最终仅剩单语 y , 单语 y 的语言地位高, 初始人口比例高, 在单语者 x 对学习 y 语言的语言态度不是特

别低的情况下,系统最终都是强势语言 y 胜出。

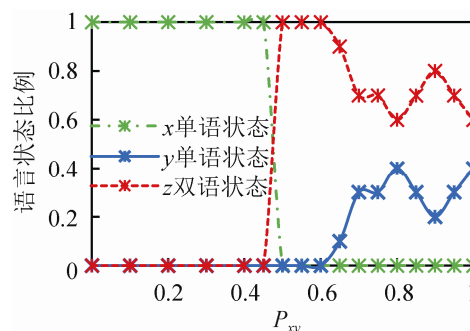
(2) 当考虑双语者对单语者的影响均较小的情况下,即 $k=0.15$, $l=0.45$,如图 10(b)所示,当 $0 \leq P_{xy} \leq 0.45$ 时,系统最终弱势语言 x 人口会占据全部人口,相较图 10(a),系统最终弱势语言胜出的区间更大,弱势语言可以完全保持,这是由于双语者对单语者 y 的影响力相较单语者 x 更大。当 $0.45 < P_{xy} < 0.5$ 时,系统最终是单语 x 和双语 z 的共存态。当 $P_{xy} \geq 0.5$ 时,系统是强势语言 y 和双语 z 的一种共存态。相较图 10(a),系统中最终不再是强势语言胜出,弱势语言以双语的形式保存下来。

(3) 当考虑双语者对单语者 x, y 的影响都比较大的情况下,即 $k=0.85$, $l=0.55$ 时,如图 10(c)所示,当 $0 \leq P_{xy} \leq 0.1$ 时,系统最终是弱势语言 x 人口会占据全部人口,区间很小,即只有在单语者 x 对学习 y 语言的语言态度特别低的情况下,弱势语言才会胜出。当 $0.1 < P_{xy} < 0.2$ 时,系统最终是弱势语言 x 和双语 z 的一种共存态。当 $P_{xy} > 0.2$ 时,系统最终是一种全双语状态。双语者对 2 种单语向双语转变都有较强的吸引力,单语者向双语者转变的概率增加,尽管双语稳定性较弱,但是整个系统仍以向双语转变为主流,双语凝集力引导系统向双语态演化起到了主导作用。

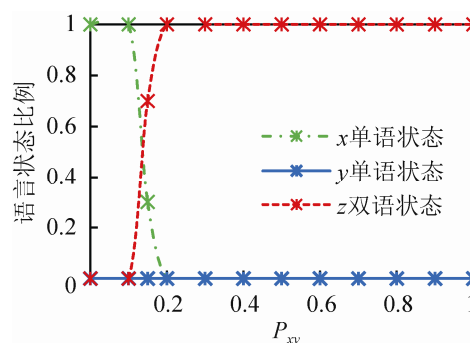
图 10 横向对比,当 k 和 l 为 0 时,随着 P_{xy} 的提高,系统最终只有 2 种状态,全部强势语言或全部弱势语言,不会出现全部双语的情形。随着 k 和 l 的提高,系统开始出现全部双语的情形, k 和 l 越大,系统最终双语人群的比例会越高,存在的区间也会变得更大。



(a) $k=0, l=0$



(b) $k=0.15, l=0.45$



(c) $k=0.85, l=0.55$

图 10 聚居条件下 P_{xy} 变化对系统演化状态的影响
Fig. 10 Effect of P_{xy} changes on system evolution state under the condition of settlement

3.3.2 双语态度改变对系统最终演化状态的影响

这里主要研究人们对学习双语态度的改变对语言竞争系统演化结果的影响。当父辈为双语者个体时,人们对学习双语的态度变化会影响子辈继承父辈双语的概率,在这里我们设置 P_a 为单一可变参数,系统的主要仿真参数设置如下: $S_x=0.4$, $S_y=0.6$, $n_x=450$, $n_y=550$, $P_{xy}=0.6$, $P_{yx}=0.45$,通过计算实验研究在聚居 4 000 步的条件下系统语言共存状态对应的 P_a 参数区间,以下将以不同 k, l 为情形来进行分析。

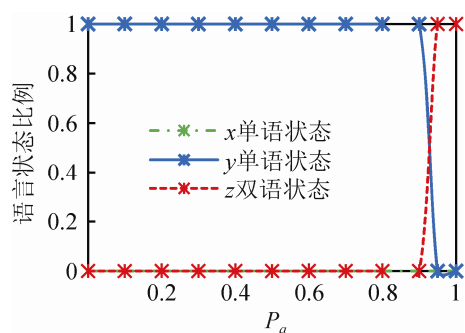
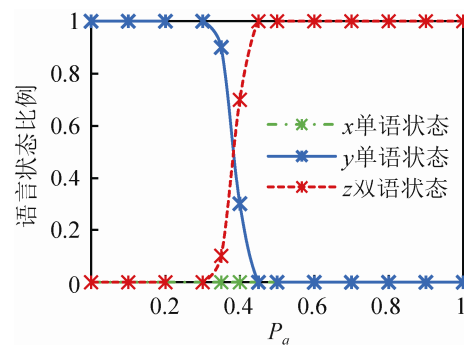
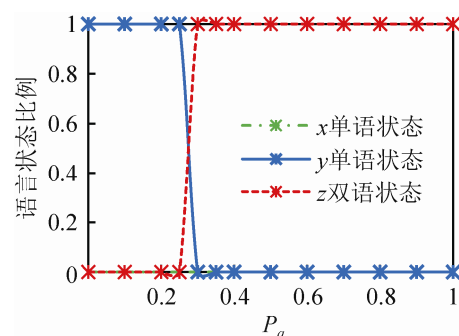
(1) 当不考虑双语者对单语者 x, y 的影响情况下,即 $k=0$, $l=0$,如图 11(a)所示,当 $0 \leq P_a \leq 0.9$ 时,系统最终强势语言会占据全部人口,随着人们对学习双语的态度提高,父辈双语者个体在遗传给子辈双语的概率增大,但由于双语者对单语者无影响的情况下,弱势语言受强势语言 y 的地位和人口密度的影响,被强势语言同化。当 $0.9 < P_a < 0.95$ 时,

系统最终是单语 y 和双语 z 的一种共存态。当 $P_a \geq 0.95$ 时, 即人们对学习双语的态度很积极, 父辈双语者个体在遗传给子辈双语的概率很大, 系统最终双语人口会占据全部人口。

(2) 当考虑双语者对单语者的影响均较小的情况下, 即 $k=0.15$, $l=0.45$, 如图 11(b)所示, 当 $0 \leq P_a \leq 0.3$ 时, 对双语学习的态度不积极的情况下, 系统最终是单语者 y 占据全部人口。单语者之间会相互学习变成双语者, 双语在遗传给子代时概率很低, 双语很难长时间存在, 弱势语言会逐渐被强势语言同化。当 $0.3 < P_a < 0.45$ 时, 系统是强势语言 y 和双语 z 的一种共存态。当 $P_a \geq 0.45$ 时, 随着人们对学习双语的态度提高, 父辈双语者个体在遗传给子辈双语的概率越大, 系统最终双语人口会占据全部人口。

(3) 当考虑双语者对单语者 x, y 的影响都比较大的情况下, 即 $k=0.85$, $l=0.55$ 时, 如图 11(c)所示, 当 $0 \leq P_a \leq 0.25$ 时, 系统最终是强势语言 y 人口会占据全部人口, 区间很小。当 $0.25 < P_a < 0.3$ 时, 系统最终是强势语言 y 和双语 z 的一种共存态。当 $P_a \geq 0.3$ 时, 系统最终是一种全双语状态, 这是由于双语者对 2 种单语向双语转变都有较强的吸引力, 即使对双语的态度不是特别高, 整个系统仍以向双语转变为主流。

图 11 横向对比, 在人们对学习双语态度积极的情况下, k 和 l 越大, 系统最终是全部双语的区间也就越大; 当人们对学习双语态度不积极的情况下, 不管 k 和 l 多大, 系统最终都是强势语言 y 胜出。

(a) $k=0, l=0$ (b) $k=0.15, l=0.45$ (c) $k=0.85, l=0.55$ 图 11 聚居条件下 P_a 变化对系统演化状态的影响Fig. 11 Effect of P_a variation on system evolution state under settlement conditions

3.4 社会网络弱连接比例变化下的动态调控分析

前面针对聚居情形对模型的系统动力学特性进行了计算实验研究, 本节研究动态调控措施对正在演化的系统动力学特性的影响。动态调控是指系统在某个初始条件下的演化过程中, 在某个时刻开始对系统进行政策调控干预, 即从该时刻改变系统某些参数的值看政策调控干预对系统演化趋势的影响。

通过对上述模型参数的分析, 提高双语者对单语者转化为双语者的影响力和改变语言态度可以实现弱势语言的保持。为了验证此模型在不同比例的弱连接关系条件下政策调控对系统演化的影响, 以图 9(a)为基准进行分析, 探讨当 $n_x=0.4$, $n_y=0.6$ 的初始人口比例的条件, 当弱势语言者 x 和双语者 z 两者的比例低于 30% 时, 通过提高双语者的影响力($k=0.5$, $l=0.4$)和改变语言态度($P_{xy}=0.5$, $P_a=0.5$)

进行调控后来看系统未来演化趋势的变化,如图12所示。

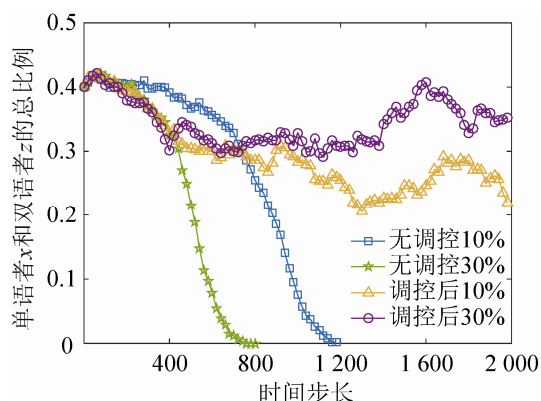


图12 社会网络弱连接比例变化对系统调控的影响
Fig. 12 Impact of changes in the proportion of weak connections in social networks on system regulation

实验表明:①在无政策调控的条件下,系统中弱势语言和双语很快就会消亡,并且随着社会网络中弱连接比例的增加(由10%变为30%),消亡的速度会加快,最终消亡的时间由大约1200步提前到800步。这说明当跨区域远距离流动和通讯联系成为常态时,人们的社会关系范围扩大、强度弱化,不利于弱势语言的保存;②通过提高双语者的影响力和改变语言态度进行政策调控后(即 $k=0.5$, $l=0.4$, $P_{xy}=0.5$, $P_a=0.5$),当系统运行到2000步时,在社会网络中的弱连接比例为10%的条件下,单语者 x 和双语者 z 的总比例为21%;当弱连接比例增加到30%时,单语者 x 和双语者 z 的总比例增加到35%。随着社会网络弱连接比例的增加,系统最终演化状态中单语者 x 和双语者 z 的总比例会增加,这说明在社会网络弱连接关系增多背景下调控措施更容易取得成效。综上所述,政策调控措施能在具有弱连接的社会网络中起到保护弱势语言的作用,使弱势语言能够以双语的形式保存下来,可以阻止和改善未来弱势语言消亡的趋势。

4 结论

本文基于改进的agent社会圈子网络建模方法构建了具有远程弱连接关系的新型社会网络,给出

了改进的agent语言水平和垂直传播模型。通过构建的模型进行大量的计算实验,研究了聚居条件下:①利用轨迹图研究双语影响力因素 k 和 l 的值改变下的系统动力学特性;②研究不同双语影响力条件下,设置语言态度为单一可改变的参数,通过计算实验作出系统的状态空间图,分析两者共同作用对系统演化结果的影响;③在社会网络弱连接关系增多背景下,如果社区出现了弱势语言持续衰变的情形,当社区中弱势语言人群比例低于警戒线时,同时提高双语作用因素和语言态度值对弱势语言恢复的影响。计算实验结果表明:即使是强弱对比显著的2种语言也可以融合发展。培养积极的语言态度,提高双语者对单语者向双语转变的影响力因子 k , l ,能引导强弱2种语言系统向稳定的深层次融合态演化。计算实验结果验证了社会学者定性研究结论,说明了本模型的正确性。模型的计算实验结果给我们语言保护工作指出新的政策着力点为:建设社会开放有度的内向型社会,培养积极的语言态度;提高双语者在母语社区的影响力,鼓励强势弱势语言社区双向语言学习,形成全社会使用双语、尊重双语者的社会风气和氛围,达到两种语言和谐共生。模型的许多方面能够被改善,在实际情况下很难测量参数 k 和 l ,量化双语者对单语者转化为双语者的影响力,需要出台一些提高增强语言保护意识和促进双语教学等政策配合来达到弱势语言保护的目的,我们未来的研究将在此基础上进一步改进模型以便更加切合实际社会。

参考文献:

- [1] Crystal D. Language Death[M]. Cambridge: Cambridge, University Press, 2002: 133-171.
- [2] Krauss M. The World's Languages in Crisis[J]. Language (S0097-8507), 1992, 68(1): 4-10.
- [3] 毛俊玉. 拿什么拯救你, 方言?[J]. 文化月刊旬刊, 2010(10): 10-13.
Mao Junyu. What Can I Save You, Dialect?[J]. Cultural Monthly, 2010(10): 10-13.
- [4] Abrams D M, Strogatz S H. Linguistics: Modelling the Dynamics of Language Death[J]. Nature (S0028-0836), 2003, 424(6951): 900-900.

- [5] Minett J W, Wang W S Y. Modeling Endangered Languages: the Effects of Bilingualism and Social Structure[J]. *Lingua* (S0024-3841), 2008, 118(1): 19-45.
- [6] Patriarca M, Leppänen T. Modeling Language Competition[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* (S0378-4371), 2004, 338(1/2): 296-299.
- [7] Patriarca M, Heinsalu E. Influence of Geography on Language Competition[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* (S0378-4371), 2009, 388(2/3): 174-186.
- [8] 陈保亚. 语势: 汉语国际化的语言条件——语言接触中的通用语形成过程分析[J]. *语言战略研究*, 2016, 1(2): 68-76.
Chen Baoya. Language Situation: the Language Conditions of Chinese Internationalization——Analysis of the Formation of Common Language in Language Contact[J]. *Study of Language Strategy*, 2016, 1(2): 68-76.
- [9] Heinsalu E, Patriarca M, Leonard J L. The Role of Bilinguals in Language Competition[J]. *Advances in Complex Systems* (S0219-5259), 2014, 17(1): 1450003.
- [10] 李甜. 从语言态度角度谈方言保护[J]. *现代语文: 学术综合版*, 2015 (5): 128-130.
Li Tian. Discussion on Dialect Protection from the Perspective of Linguistic Attitude[J]. *Modern Chinese: Academic Comprehensive ed*, 2015 (5): 128-130.
- [11] 杨玉. 民、汉、英三语背景下云南少数民族大学生语言态度研究[J]. *贵州民族研究*, 2015, 36(8): 237-240.
Yang Yu. Study on Language Attitude of Ethnic Minority College Students in Yunnan Under the Background of Civil, Chinese and English[J]. *Guizhou Ethnic Studies*, 2015, 36(8): 237-240.
- [12] 戴庆厦, 李春风. 语言和谐与边疆稳定——云南省文山州都龙镇各民族语言关系的理论分析[J]. *中南民族大学学报(人文社会科学版)*, 2017, 37(4): 176-180.
Dai Qingxia, Li Chunfeng. Language Harmony and Frontier Stability——A Theoretical Analysis of the Language Relations Among Nationalities in Dulong Town, Wenshan Prefecture, Yunnan Province[J]. *Journal of South-Central University for Nationalities (Humanities and Social Sciences)*, 2017, 37(4): 176-180.
- [13] 徐大明. 语言变异与变化[M]. 上海: 上海教育出版社, 2006: 218.
- Xu Daming. *Language Variation and Change*[M]. Shanghai: Shanghai Education Publishing House, 2006: 218.
- [14] 方小兵. 从家庭语言规划到社区语言规划[J]. *云南师范大学学报(哲学社会科学版)*, 2018, 50(6): 17-24.
Fang Xiaobing. From Family Language Planning to Community Language Planning[J]. *Journal of Yunnan Normal University (Philosophy and Social Sciences)*, 2018, 50(6): 17-24.
- [15] Castelló X, Eguiluz V M, Miguel M S. Ordering Dynamics with Two Non-Excluding Options: Bilingualism in Language Competition[J]. *New Journal of Physics* (S1367-2630), 2006, 8(12): 308-322.
- [16] Kosmidis K, Halley J M, Argyrakis P. Language Evolution and Population Dynamics in a System of Two Interacting Species[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* (S0378-4371), 2005, 353(2): 595-612.
- [17] Hamill L, Gilbert N. Social Circles: A Simple Structure for Agent-based Social Network Models[J]. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* (S1460-7425), 2009, 12(23): 3.
- [18] 张寿明, 于群修, 毕贵红. 多语竞争复杂 agent 网络语言竞争与演化分析[J]. *系统仿真学报*, 2017, 29(3): 463-478, 486.
Zhang Shouming, Yu Qunxiu, Bi Guihong. Analysis of Language Competition and Evolution of Multi-lingual Competitive Agent Networks[J]. *Journal of System Simulation*, 2017, 29(3): 463-478, 486.
- [19] Huang C Y. A Novel Small-World Model: Using Social Mirror Identities for Epidemic Simulations[J]. *Simulation* (S0037-5497), 2005, 81(10): 671-699.
- [20] 葛渊峥. 基于 agent 的人工社会框架设计与生成方法[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2014.
Ge Yuanzheng. Design and Generation Method of Artificial Social Framework Based on Agent [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2014.
- [21] Wilensky U. NetLogo[EB/OL]. [2020-12-20]. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo>. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston, IL, 1999.