

无价值商品作为交换媒介：一个基于主体的模拟途径

张世伟，罗胤，刁莉男

(吉林大学数量经济研究中心，吉林 长春 130012)

内容提要：本文应用基于人工主体的计算途径理解和设计了无价值商品作为交换媒介的 Kiyotaki 和 Wright (1989) 货币搜索模型的实验室环境。在人类主体实验证据的基础上建模人工主体的行为规则。实验焦点在于在这个环境中“代币”商品所起的作用。与 Duffy 和 Ochs (2000) 相似，我们的结果对理论预测提供了一些支持，发现当交易降低主体的储存成本时，他们几乎总是愿意换取代币商品，而在理论预测主体会接受交易代币商品换取储存成本较高的商品的情况下，主体却经常拒绝接受。我们的实验进一步证实基于人工主体建模是一种对理解和设计人类主体实验有用的设计。

关键词：货币的 Kiyotaki-Wright 模型；分类器系统；基于主体计算经济；代币

中图分类号：F224.0 **文件标识码：**A

1 引言

如古典经济学家和早期的新古典经济学家所强调的，交换媒介功能是货币的一项基本特性。经济中，使用交换媒介（货币）的交易是如何出现的呢？哪些商品可以担当交换媒介呢？对于这些问题，很难通过正式建模来解答。Kiyotaki 和 Wright (1989) 为此提出了一个货币理论模型，在重复的“维克塞尔三角”假设下研究纳什均衡中三类理性主体的相互作用，并描述了某种价值储藏物担当交换媒介的条件。根据 Kiyotaki 和 Wright (1989) 提出的理论，担当交换媒介的商品是利用其内在价值还是利用政府法令声明赋予的价值并不重要，重要的是商品要耐用且储存成本不太高。某种商品可以内生地作为交换媒介或货币出现要取决于它们的内在特性和外在的信念。

Kiyotaki-Wright 模型的本质是 Jevons (1875) 所称的“缺乏需求相互一致”。在这样的环境中，个体不能直接用他们的生产产品来换取可以为他们带来正效用的商品，因此个体必须在竞争的商品之间制定交易决策。主体的交易策略有两种：基本策略和投机策略。基本策略是单纯考虑降低储存成本的策略，而投机策略是主体为了以后可以更容易换得其消费品而在当前同意换取增加储存成本的商品的策略。与两种策略相对应得到了两种均衡：基本均衡和投机均衡。此外，模型的一个版本中还引入了法定货币，并得到了法定货币作为一般交换媒介循环的均衡。

Kiyotaki 和 Wright (1989) 只提供了 Kiyotaki-Wright 模型均衡特性的特征描述，而并没有尝试描述得到均衡的过程，或考虑一种或更多的商品是如何成为交换的一般媒介的。该环境中的行为进化吸引了许多研究者的注意，他们希望通过实验的证据对该模型的纳什均衡预期进行检测。目前所采用的实验方法主要有两种，一是使用有限的理性人工主体的群体——“基于主体计算途径”；二是通过具有支付人类主体的（“真实”主体）受控实验室实验。

Brown (1996) 首先借助人类主体进行了实验，主体大体上愿意利用商品作为交换媒介。对于某些参数设置来说，主体可以执行投机策略，但未得到对投机策略的普遍支持，没能实现由基本策略到投机策略的转变。之后，Duffy 和 Ochs (1999) 考虑提供给主体整体规模的信息，发现主体对初始化方案和贴现因子的变化没有明显的反应，但对消费品效用的变化会产生反应，主体对投机策

略的支持并不充分。接着，Duffy 和 Ochs (2000) 又使用人类主体实验研究了 Kiyotaki-Wright 环境中“代币”商品所起的作用。在消费或生产中不具有内在价值的可储藏商品称之为“代币”。除了采用代币商品在纯策略纳什均衡中作为交换媒介的 Kiyotaki-Wright (1989) 模型的参数外，实验还引进了 Aiyagari 和 Wallace (1992) 提出的代币商品不是储存成本最低的商品的情况。结果发现，当交易降低主体的储存成本时，他们几乎总是愿意换取代币商品。而在理论预测主体会接受交易代币商品换取储存成本较高的商品的情况下，主体却经常拒绝接受。

Marimon, McGrattan 和 Sargent (1990) 则最先在带有人工智能主体的经济中模拟了货币担当交换媒介的过程及主体对其行为的学习。主体的行为由 Holland 分类器系统决定，每类主体拥有一个共同的分类器系统，实验通过穷举法和遗传算法两种方式添加规则。在其模拟的大多数经济中，即使主体开始于随机的规则，他们的交易和消费模式仍会收敛到稳态纳什均衡。在多重均衡的经济中，模型中只出现了储存成本较低的商品充当交换媒介的均衡。特别地，他们研究了引入储存成本为零的法定货币商品 0 的经济，在这种经济中，法定货币被普遍地接受，虽然没有主体能够从消费商品 0 中得到效用。Staudinger (1998) 使用纯遗传算法检测了模型，发现如果商品储存成本的差异足够小的话，遗传算法也可以得到投机均衡。Basci (1999) 则将模仿引入到学习的过程中，加速了收敛的过程，但当最优和次优的结果相接近时，有可能收敛到次优的情况。

事实上，如我们所知，这两类实验方法在实验的设计上有很大的差异，例如，上面引用的所有基于主体研究都涉及比具有人类主体的受控实验室环境中更多的人工主体，这些基于主体环境运行了比人类主体实验可能的更多的期数。此外，所有基于主体模拟都考虑主体间直接或间接的交流（例如，经由遗传算法的使用来更新策略），而人类主体实验则不存在的一个特点。Duffy (2000) 第一次将人工主体实验和人类主体实验联接起来。Duffy (2000) 指出 Duffy 与 Ochs (1999a) 中报告的人类主体实验的某些特点，设计与人类主体实验环境相当相似的人工主体模型，并将二者的结果相比较。结果令人鼓舞，人类主体实验的结果大体上与人工主体模拟预测的结果相同。

这里，我们基于 Duffy 和 Ochs (2000)，通过与其相似的人工主体实验室设计来模拟代币商品担当交换媒介的过程，并比较两个实验的结果，希望可以提供对人类主体实验结果的一些支持，进一步探索人类主体实验和人工主体实验的相关性。我们采纳了 Duffy (2000) 中对人类主体实验的某些特点的描述：主体不进行消费决策，只要有消费品就消费；主体总愿意换取其消费品；拥有同类商品的主体之间不进行消费。

2 Kiyotaki-Wright 环境

我们研究具有单一代币物的 Kiyotaki 和 Wright (1989) 货币理论模型。时间 t 是离散的并永远延续下去，每个时刻有三种不可分割的商品，商品 $j = 1, 2, 3$ 。 N 个主体被平均分成三类，类型 $\tau = 1, 2, 3$ 。 τ 类主体只能从消费 τ 类商品中得到正效用，但其生产的商品 $j \neq \tau$ 。所有商品储存都是有价的，但是主体在一个时刻只可以储存某种商品一单位，由于商品是不可分割的，所以一个时刻只有一种商品。储存成本按类型和商品而具体确定，我们令 $c_{\tau j}$ 表示 τ 类主体储存商品 j 的成本。对所有 τ ，我们假设 $c_{\tau 3} > c_{\tau 2} > c_{\tau 1} \geq 0$ 。对于 τ 类主体，令 U_{τ} 表示消费商品 τ 的即时效用， D_{τ} 表示生产商品 $j \neq \tau$ 的即时负效用， $\beta \in (0, 1)$ 表示贴现因子（各类相同）。那么 τ 类主体的预期贴现终生效用是：

$$E \sum_{t=0}^{\infty} \beta^t [I_{\tau}^U(t) U_{\tau} - I_j^D(t) D_{\tau} - I_k^C(t) c_{\tau k}]$$

其中， $I_{\tau}^U(t)$ 是一个（随机）指示函数，如果主体消费了他的消费品 τ ，它就等于 1，否则等于 0；如果主体生产其生产品 $j \neq \tau$ ， $I_j^D(t)$ 等于 1，否则等于 0；如果主体在 t 期末储存任意商品 k ， $I_k^C(t)$ 等于 1，否则等于 0。我们设 $u_{\tau} = U_{\tau} - D_{\tau}$ 表示消费加生产的净效用。

在每个交易期开始时，所有 N 个主体以相同的概率随机两两配对。这种随机匹配技术在匹配时

不考虑主体类型。只有配成对的主体才能够进行交易。然后，每个主体开始制定交易决策，决定是否用其当前持有的商品换取与其配对的主体所持有的商品。交易由配对的双方共同决定，没有拍卖者或其他外部权威人士强加任何安排。只有当双方都同意交易时交易才发生。因为商品是不可分割的，而且每个主体只能储存一单位商品，所以交换总是一对一进行的。在 t 时刻，如果 τ 类主体很幸运得到了他的消费品 τ ，他将消费它并生产一单位新的生产品。因此，每个 τ 类主体总是确切地拥有一单位商品 τ 以外的商品。通过时间路径 $p(t) = [\dots p_{\tau j}(t) \dots]$ 来描述潜在匹配分布的特征，其中 $p_{\tau j}(t)$ 是 τ 类主体在 t 期持有商品 j 的比率。假设给定其他主体的策略和 $p(t)$ ，每个主体通过选择交易策略来最大化扣除了生产成本和储存成本的消费净利的预期贴现效用。

这里，我们采用 Kiyotaki- Wright 称之为模型 A 的情况，主体与其消费品和生产品的对应关系如表 1。

表 1：主体与其消费品和生产品的对应关系

主体 τ	消费品	生产品
1	1	2
2	2	3
3	3	1

对于储存成本和净效用的所有参数值来说，模型只存在唯一的均衡。只是，对一些参数值来说，模型存在这种均衡，而对于其他的一些参数值来说，模型存在具有不同特性的其他均衡。一种均衡被作为基本均衡，因为与储存成本较高的商品相比主体总是偏好储存成本较低的商品，除非前者是他们自己的消费品，所以，当决定是否交易的时候，主体只需要看“基本的”储存成本和效用值。而另外的均衡当作投机均衡，因为主体有时以储存成本较低的商品换取储存成本较高的商品，不是他们希望消费它而是他们理性地预期这是最终换取他们想要消费的其他商品的最好方法，就是说，因为这种商品更适于销售。根据 Kiyotaki 和 Wright (1989)，在模型 A 中，对第 2 类和第 3 类主体来说，基本策略总是最佳的反应，而对于第 1 类主体来说，当且仅当 $c_{13} - c_{12} > (p_{31} - p_{21})bu_1$ 时，基本策略是最佳的。这个不等式说明储存商品 3 而不是商品 2 的成本超过商品 3 与商品 2 相比的相关市场能力转让的贴现效用收益，当且仅当均衡中第 3 类主体比第 2 类主体更有可能持有商品 1 时，条件成立。如果 $c_{13} - c_{12} < (p_{31} - p_{21})bu_1$ ，所有主体的基本策略不会组成均衡。第 1 类主体对这个情况中的基本策略的最佳反应是通过试图以商品 2 换取具有更高储存成本但有更大市场能力的商品 3 来投机，即得到了投机均衡。

在此基础上，如 Kiyotaki 和 Wright (1989)，模型引入商品 0 作为代币物；没有主体需要消费它，因而它是无价值的，但其储存也有成本。商品 0 的供给是外生的，没有主体需要生产它。整体中储存商品 0 的比例是外生给定的常量， $m \in (0,1)$ 。整体其余部分 $1 - m$ 储存有价值的商品。但是，我们假设对于各类主体来说四种商品储存成本是一致的，记为 c_j 。同样的为了简便我们假设生产是无成本的，三类局中人从消费品中得到相同的效用 $u > c_3$ 。

交易中，如果 τ 类主体成功地换取了商品 τ ，他会立即消费该商品得到效用 u ，并生产一单位新的生产品 $\tau + 1$ 来储存，该期他成功交易换取其消费品的净效用为 $u - c_j > 0$ ，其中 $j = \tau + 1$ 。如果一个 τ 类局中人成功交易换取了某种商品 $j \neq \tau$ ，那么他持有的商品受这个交易决策的影响而改变。如果交易没有达成一致，双方继续持有前期持有的商品。无论是后面两种情况中的哪种，每个局中人都负担自己在交易完成后所持有商品的储存成本，所以局中人该期的净效用都是 $-c_j$ ，其中 j 是其期末持有的商品。由于没有主体生产或消费商品 0，商品 0 也不被剔除，所以经济中商品 0 的总储备 Nm 不变，而其他商品的总储备会根据主体的配对及其交易决策而有所变化。

2.1 模型参数

由于我们的焦点在于无价值商品作为交换媒介的使用，所以我们考虑了该商品储存成本的两种不同的情况。第一种情况是 Kiyotaki 和 Wright (1989) 所研究的。

$$\text{情况 1: } 0 = c_0 < c_1$$

在这种情况下，代币商品既是无成本的又是储存成本最低的商品。第二种情况是 Aiyagari 和 Wallace (1992) 提出的。

$$\text{情况 2: } 0 = c_1 < c_0 < c_2$$

在这种情况下，商品 0 既不是无成本的，也不是储存成本最低的商品。我们研究的 Kiyotaki-Wright (1989) 模型的具体版本包含两种主要的参数设置，参数 1 和 2，它们分别与情况 1 和 2 相一致。这两组参数在表 2 中给出。注意，只有第 1 组参数中的 m 值变化，此外第 1 组和第 2 组参数中储存成本 c_j 、消费品效用值 u 和 m 的值都不同。这些参数变化对于确定本文中所测试的两种不同的静态纳什均衡是必需的。

表 2 模型参数

参数组	c_0	c_1	c_2	c_3	u	m
1	0	1	4	9	20	0.250, 0.333, 0.500
2	1	0	23	24	100	0.167

2.2 稳态行为

我们的目标是确定主体是否采用与模型稳态预测相一致的交易策略。现在我们讨论这些稳态预测。由于我们的焦点在于稳态行为，所以我们不再讨论与时间有关的内容。

令 $v_{\tau,i}^j$ 表示期末 τ 类局中人 i 从储存商品 j 中得到的预期贴现效用。令 $s_{\tau,i}^{jk} \in [0,1]$ 表示当储存有商品 j 的 τ 类局中人 i 与储存商品 $k \neq j$ 的局中人随机配对时他所执行的策略。如果 $s_{\tau,i}^{jk} = 1$ ，那么 τ 类局中人愿意用商品 j 换取商品 k ；如果 $s_{\tau,i}^{jk} = 0$ 则 τ 类局中人拒绝交易。在稳定状态中，所有 τ 类局中人 $i = 1, 2, \dots, N/3$ 执行相同的不随时间变化的策略，因此，我们不再讨论角标 i 。

与 Kiyotaki 和 Wright (1989) 中一样，我们的焦点在于稳态纯策略均衡，所以 $s_{\tau}^{jk} \in \{0,1\}, \forall \tau, j, k$ 。

在第 1 和第 2 两组参数下，无论何时 τ 类局中人在交易中遇到商品 τ ，换取商品 τ 的策略总是最优的，因为对于所有 τ 都有 $v_{\tau}^{\tau} = \max_j v_{\tau}^j$ 。其他值的等级取决于具体使用的参数组。由于局中人总是换取其消费品，假设策略是对称的，我们可以将 τ 类局中人的稳态纯策略向量简写为

$$s_{\tau} = (s_{\tau}^{\tau+1,0}, s_{\tau}^{k,0}, s_{\tau}^{\tau+1,k})$$

其中 $\tau+1$ 是 τ 类局中人的生产产品， $k \neq 0$ 是 τ 类局中人不生产也不消费的另一个内在有价值的商品。

在第 1 组参数下，商品 0 是储存成本最低的商品，Kiyotaki 和 Wright (1989) 显示有两个稳态纯策略均衡存在。第一个均衡中，商品 0 有正值，三类局中人的策略描述为：

$$s_1 = (1,1,0), s_2 = (1,1,1), s_3 = (1,1,0)$$

在这个稳定状态中，所有三类主体都发现无论何时在交易中遇到商品 0 换取它都是最优的，这使得商品 0 成为一般的交换媒介。此外，在这个稳定状态中，所有局中人都遵循“基本的”储存成本减少的策略。具体来说，第 1 和第 3 类局中人分别拒绝用他们的生产产品商品 2 和商品 1 换取储存成本更高的商品 3 和商品 2，第 2 类局中人总愿意用他们生产的商品 3 换取储存成本较低的商品 1。因此，商品 1 也在这个稳态均衡中担当了交换媒介（有限的）。

在另一个稳态均衡中，商品 0 不能作为交换媒介循环，只因为没有人相信它在交换中有价值，即对于所有 τ 都有 $v_{\tau}^0 = 0$ 。在这个均衡中，所有局中人都拒绝在交易中接受商品 0，但总愿意接受储存成本比其当前持有的商品更低的其他任何商品。具体来说，在这种稳定状态中三类局中人的策略描述为：

$$s_1 = (0,0,0), s_2 = (0,0,1), s_3 = (0,0,0)$$

在这种稳定状态中，商品 1 是唯一的交换媒介。

我们采用局中人愿意接受某种商品的频率来评估结果，它是每期商品被接受的次数与商品被提供的次数的比。由于这里我们的焦点在于商品 0 担当交换媒介的情况，所以我们看到在第 1 组参数下，当遇到商品 0 时，无论 m 为何值它被接受的频率总是 100%。更重要的是注意到，对于另一个交换媒介商品 1 的稳态接受频率也很高，但是这个接受频率随 m 的增加而减少。而且随 m 的增加对商品 2 和商品 3 的接受频率也略有下降。但是由于这些商品都不在稳态均衡中担当交换媒介。因此，我们将我们的注意力集中于随 m 的增加商品 0 的接受保持不变和随 m 的增加商品 1 的接受下降的假定上。

我们接着考虑 Aiyagari 和 Wallace (1992) 研究的商品 0 不是储存成本最低的商品的情况。这里也有两种均衡。第一种均衡中，商品 0 担当有限的交换媒介，它不再是储存无成本的且储存成本比商品 1 要高。在这种稳定状态中三类局中人的策略描述是：

$$s_1 = (1,0,1), s_2 = (1,0,1), s_3 = (0,1,0)$$

注意，第 1 类局中人总是接受用其生产的商品 2 换取储存成本较低的商品 0，在这种稳定状态中，他们发现投机于商品 3 是最优的，拒绝交易商品 3 换取储存成本较低的商品 0。相应地，他们总是愿意用商品 0 换取商品 3。事实上，第 1 类局中人不先用商品 0 换取商品 3 的话将不能用商品 0 直接换取他们可以消费的商品 1。第 1 类局中人也执行交易他们生产的商品 2 换取储存成本较高的商品 3 的投机策略。

第 2 类和第 3 类局中人遵循如情况 1 中的基本交易策略；然而，现在商品 1 的储存成本低于商品 0 的事实稍微改变了他们的行为。具体来说，第 2 类局中人将继续愿意交易他们生产的商品 3 换取商品 0，但是将拒绝交易商品 1 换取商品 0，因为商品 1 现在是无储存成本的。由于同样的原因，第 3 类局中人现在拒绝交易他们生产的商品 1 换取商品 0。第 2 类局中人继续愿意交易他们生产的商品 3 换取商品 1。

注意，在这种稳定状态中有三种交换媒介。商品 1，储存成本最低的商品，是普遍接受的交换媒介。此外，商品 0 和商品 3 也担当有限的交换媒介；第 1 类和第 2 类局中人从彼此那里接受商品 0；第 1 类局中人将在交易中接受用商品 2 换取商品 0，第 2 类局中人将在交易中接受用商品 3 换取商品 0。然而，第 2 类局中人拒绝用商品 1 换取商品 0。第 3 类局中人决不接受商品 3 外的任何商品，所以商品 0 不再是普遍接受的交换媒介。同理，商品 3 在这种均衡中担当有限的交换媒介，因为第 1 类局中人将用商品 0 或商品 2 从第 2 类局中人那里接受商品 3，但是储存有商品 0 或商品 1 的第 2 类局中人不同意换取商品 3。

情况 2 中的另一个纯策略稳定状态是，商品 0 对任何类型都没有价值因而在所有交易中都被拒绝。在这种稳定状态中三类局中人的策略描述是：

$$s_1 = (0,0,1), s_2 = (0,0,1), s_3 = (0,0,0)$$

这个策略描述与 Kiyotaki 和 Wright (1989) 对没有代币物的具有三种内在有价值物品（商品）的情况所描述的“投机”稳态均衡相同。

3 分类器系统

分类器系统是一种学习系统，1986年由Holland等人提出，它通过学习句法规则来指导系统在外环境中的行为，将称为分类器的简单逻辑规则与使用遗传算法搜索新的分类器相结合。通常分类器系统被看作是一种个体学习模型。

我们采用分类器系统来模拟主体的学习行为，主体通过分类器系统来制定决策。在 t 时期开始主体 i 持有商品 x_{it} ，与另一个主体 $\rho_t(i)$ 随机匹配。匹配过程结束后，主体 i 交易前的状态为 $z_{it} = (x_{it}, x_{\rho_t(i)t})$ 。我们用 λ_{it} 表示主体 i 在 t 时期的交易决策：如果主体 i 同意交易， $\lambda_{it} = 1$ ，否则 $\lambda_{it} = 0$ 。同理， $\lambda_{\rho_t(i)t}$ 表示主体 $\rho_t(i)$ 在 t 时期的决策。只有在 $\lambda_{it} \cdot \lambda_{\rho_t(i)t} = 1$ 时，交易才发生。

用 x_{it}^+ 表示主体 i 在 t 时期交易后（但在消费前）持有的商品。然后我们有

$$x_{it}^+ = (1 - \lambda_{it} \lambda_{\rho_t(i)t}) x_{it} + \lambda_{it} \lambda_{\rho_t(i)t} x_{\rho_t(i)t} \quad (1)$$

用 γ_{it} 表示主体 i 在 t 时期的消费决策：如果主体 i 同意消费， $\gamma_{it} = 1$ ，否则 $\gamma_{it} = 0$ 。如果主体 i 换取了消费品进行消费，他自动生产商品 $f(i)$ ，并带入 $t+1$ 期。在Kiyotaki-Wright的模型A的情况下，主体 i 在 $t+1$ 时期的初期持有的商品为：

$$x_{it+1} = \gamma_{it} f(i) + (1 - \gamma_{it}) ((1 - \lambda_{it} \lambda_{\rho_t(i)t}) x_{it} + \lambda_{it} \lambda_{\rho_t(i)t} x_{\rho_t(i)t}) \quad (2)$$

交易分类器系统接受的输入数据是交易前的状态 $z_{it} = (x_{it}, x_{\rho_t(i)t})$ ，这个分类器系统决定交易决策 λ_{it} ，结合主体 $\rho_t(i)$ 的 $\lambda_{\rho_t(i)t}$ 来决定 x_{it}^+ ，（见等式（1）），之后，主体将 x_{it}^+ 作为输入数据做出消费决策 γ_{it} ，决定是否进行消费。主体在每一个时期顺次制定交易决策和消费决策。由于我们这里采用即时消费的策略，所以只为主体分配交易分类器系统，而不分配消费分类器系统。

一个分类器系统通常包括下面一些组成部分：

- (1) 一个三元字符串，称为“分类器”。
- (2) 一个解释和说明字符串（分类器）的系统，将状态转化为决策。字符串的第一部分代表具体的状态或条件，第二部分代表行为，这样个体的分类器为一个（状态，行为）对，在给定状态下，分类器系统中可以有多个分类器。
- (3) 在 $t = 0, 1, \dots$ 时期，每一个分类器都有相对应的强度。
- (4) 一个读取外部信息或“状态”和决定相关分类器集合的系统，如在某种状态下，满足条件的分类器的集合。在给定状态下，系统有时可以包含具有不同行为的若干个分类器。
- (5) 一个“投标系统”来决定在 t 时期哪一个相关的分类器起作用。在 t 时期，所有满足真实状态的分类器中，其作用的是“得分最高的投标者”。（这条规则可以被简单地修改为允许有“随机投标”，而赢得投标的概率直接与强度有关）。
- (6) 一个用来更换分类器强度的“会计系统”，其依据决策结果的净收益。

还可能有：

- (7) 产生新字符串和除去旧字符串的遗传算法。当没有与现实情况相匹配的字符时，就会运行遗传算法，遗传算法还被用作一种工具不时地促进实验进行。

现在，我们描述Kiyotaki-Wright模型中的每一个元素。我们的每个主体都具有一个交易分类器系统。分类器由长度为9的三维字符串组成，前4个字符代表自己拥有的商品，接下来4个字符代表所配对的搭档持有的商品，最后1位代表交易决策。表3列出了所有商品的编码，代码用三维字符（1, 0, #）来表示，“#”表示“不关心”，最后1位用二维字符（1, 0）表示，1表示交易，0

表示不交易。

对于该分类器系统来说，很明显应该有 $4^4 \times 4^4 \times 2 = 131072$ 种分类器。然而，大多数的分类器对于模型来说都是多余的。而且，根据人类主体实验特点有一部分分类器也是不必要的。因此，系统只需要 98 条字符串就可以表示全部的情况。

表 3 分类器商品编码

代码	含义	代码	含义
1000	商品 1	0###	非商品 1
0100	商品 2	#0##	非商品 2
0010	商品 3	##0#	非商品 3
0001	商品 0	###0	非商品 0

我们实行直接进行消费的策略，环境中的每个主体都只拥有交易分类器系统。分配给 τ 类主体 i 的每个分类器 e 一个强度，用 $S_i(t)$ 来表示。 $S_i(t)$ 由“会计系统”产生并随时间进化，主体根据分类器的强度来做决策。在既定的条件 $z_{it} = (x_{it}, x_{p_i(i)t})$ 下，从分类器系统中可得到一个满足已知条件的分类器集合。我们将这样的集合 $M(z_{it})$ 定义为：

$$M(z_{it}) = \{e : z_{it} \text{ 满足分类器 } e \text{ 的条件}\} \quad (3)$$

$M(z_{it})$ 中的元素形成了进行投标的潜在“投标者”，目的是决定主体 i 在 t 时期应使用哪个分类器。当主体 i 在 t 期遇到状态 z_{it} ，属于集合 $M(z_{it})$ 的分类器中强度最高的分类器做决策。令 $e_t(z_{it})$ 表示在 t 期决定是否交易的分类器的索引（编号）

$$e_t(z_{it}) = \arg \max \{S_i(t) : e \in M(z_{it})\} \quad (4)$$

分类器 $e_t(z_{it})$ 的行为结果（交易或不交易）由 λ_{it} 表示。等式（3）和（4）描述了一个“投标系统”，通过它强度最大的规则有权决定主体 i 在 t 时期的行为。

分类器 e 强度随时间的改变而改变。在 t 时期， e 的强度为 $S_i(t)$ ，如果分类器 e 的条件被满足[如 $e \in M_e(z_{it})$]，则 e 进行投标： $b(e)S_i(t)$ ， $b(e)$ 是决定于分类器 e 的正分数。如果 e 赢得投标， $b(e)S_i(t)$ 就会从它的强度中减去，这个值会加到其他的分类器上。我们选择的投标函数为：

$$b(e) = 0.025 + 0.025\sigma_e \quad (5)$$

其中 σ_e 是个分数， $\sigma_e = 1 / (1 + \text{字符串中“#”的数量})$

只有赢得投标的分类器才通过减少它们的强度来支付投标。 t 时期获胜的分类器的投标值付给 $t-1$ 时期获胜的分类器，它通过将 t 时期的状态设置为 z_{it} 来获得补偿。 $U_i(\gamma_{it})$ 是主体做出最后的消费决策 γ_{it} 时的外部强度补偿。如果 t 时期交易后的状态 x_{it}^+ 为，那么我们有：

$$U_i(\gamma_{it}) = \gamma_{it}[u - c(f(i))] + (1 - \gamma_{it})c(x_{it}^+) \quad (6)$$

分类器系统的整个学习过程可以这样描述：

- 主体随机配对
- 主体分别根据自己和对方持有的商品找到符合条件的分类器
- 计算分类器的投标 $b(e)S_i(t)$ ，其中 $b(e) = 0.025 + 0.025\sigma_e$ ， $\sigma_e = 1 / (1 + \text{字符串中“#”的数量})$ ，投标最高的分类器获胜

4.1 当商品储存成本为零时观察到的行为

当商品 0 的储存成本最低时，存在商品 0 被普遍接受和没有人相信商品 0 两种稳态均衡。在这两种稳定状态中，三类主体都应该执行基本策略。

表 5a、5b 和 5c 报告了，在商品 0 没有储存成本的 9 次实验中每类主体愿意换取商品 0 的总频率。在这些表中，根据每类主体用来换取商品 0 的商品的不同进行了进一步的划分。如表所示，当商品 0 的储存成本最低时（储存成本为零），它在交易中得到了普遍地接受。表 5a、5b 和 5c 的接受频率都接近于对商品 0 担当交换媒介的稳定状态的预期 1.00。无论主体持有的商品是其产品或是其不生产也不消费的商品，只要他们持有的不是商品 0（由于主体遇到消费品就进行消费，因而任何主体都不会持有其消费品），那么当他们遇到持有商品 0 的主体时就都愿意进行交易。这和 Duffy 和 Ochs（2000）的发现有些不同，我们的实验中并没有看出第 2 类局中人对于用商品 1 还是用商品 3 交换商品 0 时行为的差异。我们的结果与均衡的预期更为贴近。

表 5a 第 1 类主体愿意换取商品 0 的频率

实验序号	$u =$	第 1 类主体换取商品 0		第 1 类主体以商品 2 换取商品 0		第 1 类主体以商品 3 换取商品 0	
		前半部	后半部	前半部	后半部	前半部	后半部
A1	20	0.97	0.99	0.98	0.99	0.98	0.98
A2	20	0.98	1.00	0.97	1.00	0.96	1.00
A3	20	0.95	0.98	0.97	0.99	0.98	1.00
B1	20	0.97	0.99	0.99	0.98	0.98	0.99
B2	20	0.99	0.98	0.97	0.98	0.98	0.98
B3	20	0.97	0.98	0.98	0.99	0.95	0.99
C1	20	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
C2	20	0.98	0.98	0.98	0.99	0.97	0.99
C3	20	0.97	0.99	0.98	0.99	0.98	1.00

表 5b 第 2 类主体愿意换取商品 0 的频率

实验序号	$u =$	第 2 类主体换取商品 0		第 2 类主体以商品 1 换取商品 0		第 2 类主体以商品 3 换取商品 0	
		前半部	后半部	前半部	后半部	前半部	后半部
A1	20	0.98	0.99	0.98	0.99	0.98	0.99
A2	20	0.98	1.00	0.97	1.00	0.95	1.00
A3	20	0.97	0.98	0.95	0.99	0.96	0.99
B1	20	0.98	0.97	0.98	0.98	0.98	0.99
B2	20	0.98	0.99	0.98	0.98	0.98	0.99
B3	20	0.97	0.99	0.97	0.99	0.97	0.99
C1	20	0.98	0.99	0.98	0.99	0.99	0.98
C2	20	0.98	0.98	0.98	0.98	0.99	0.99
C3	20	0.97	0.99	0.97	0.99	0.98	0.99

表 5a、5b 和 5c 中报告的所有类型的主体换取商品 0 的频率均为正，这说明局中人相信商品 0 有价值。如果商品 0 在这种环境中担当交换媒介的话，那么持有他的局中人应该只愿意用它换取其

消费品，而不愿换取其他商品。事实上，表 6a、6b 和 6c 的左栏就揭示了这样的倾向，如果没什么意外，局中人几乎不愿意用商品 0 换取他们不生产也不消费的商品。

表 5c 第 3 类主体愿意换取商品 0 的频率

实验序号	$u =$	第 3 类主体换取商品 0		第 3 类主体以商品 1 换取商品 0		第 3 类主体以商品 2 换取商品 0	
		前半部	后半部	前半部	后半部	前半部	后半部
A1	20	0.97	0.99	0.98	0.98	0.96	0.99
A2	20	0.97	1.00	0.97	1.00	0.96	1.00
A3	20	0.97	0.99	0.98	1.00	0.98	0.99
B1	20	0.99	0.98	0.98	0.98	0.99	0.98
B2	20	0.98	0.99	0.98	0.99	0.98	0.98
B3	20	0.97	0.99	0.97	0.99	0.98	1.00
C1	20	0.98	0.99	0.98	0.98	0.99	0.99
C2	20	0.98	0.98	0.98	0.99	0.99	0.99
C3	20	0.97	0.99	0.97	0.99	0.98	1.00

表 6a 第 1 类主体愿意换取商品 3 的频率

实验序号	$u =$	第 1 类主体以商品 0 换取商品 3		第 1 类主体以商品 2 换取商品 3	
		前半部	后半部	前半部	后半部
A1	20	0.02	0.01	0.43	0.37
A2	20	0.05	0.00	0.42	0.38
A3	20	0.03	0.00	0.48	0.37
B1	20	0.01	0.00	0.45	0.35
B2	20	0.03	0.00	0.43	0.39
B3	20	0.02	0.01	0.47	0.41
C1	20	0.04	0.02	0.48	0.29
C2	20	0.02	0.00	0.60	0.45
C3	20	0.02	0.00	0.50	0.40

表 6b 第 2 类主体愿意换取商品 1 的频率

实验序号	$u =$	第 2 类主体以商品 0 换取商品 1		第 2 类主体以商品 3 换取商品 1	
		前半部	后半部	前半部	后半部
A1	20	0.04	0.01	0.94	0.93
A2	20	0.04	0.00	0.94	0.95
A3	20	0.02	0.01	0.93	0.94
B1	20	0.04	0.02	0.92	0.86
B2	20	0.03	0.00	0.91	0.88
B3	20	0.03	0.02	0.92	0.94
C1	20	0.04	0.00	0.76	0.91
C2	20	0.05	0.00	0.94	0.91
C3	20	0.03	0.02	0.89	0.96

表 6c 第 3 类主体愿意换取商品 2 的频率

实验序号	$u =$	第 3 类主体以商品 0 换取商品 2		第 3 类主体以商品 1 换取商品 2	
		前半部	后半部	前半部	后半部
A1	20	0.01	0.00	0.34	0.26
A2	20	0.02	0.01	0.31	0.29
A3	20	0.04	0.00	0.32	0.25
B1	20	0.03	0.00	0.31	0.26
B2	20	0.02	0.01	0.34	0.27
B3	20	0.01	0.00	0.32	0.25
C1	20	0.02	0.00	0.35	0.21
C2	20	0.01	0.00	0.33	0.20
C3	20	0.02	0.00	0.38	0.27

表 6a、6b 和 6c 的右栏显示了每类主体愿意用他们的生产品换取代币商品以外的他们不生产也不消费的商品的频率。在这样的交易环境下，稳态预期是所有三类局中人都遵循基本策略。显然，在大多数情况下主体采用了这样的策略。具体来说，第 1 类和第 3 类局中人分别拒绝用其生产品商品 2 和商品 1 换取储存成本更高的商品 3 和商品 2，而第 2 类局中人愿意用生产品商品 3 换取储存成本较低的商品 1，商品 1 也担当了交换媒介。然而，也有一些例外的情况，实验中有一些第 1 类局中人坚持投机于商品 3，也有一些第 3 类局中人坚持投机于商品 2。

实验 A1-A3，B1-B3，C1-C3 间唯一变化的处理变量是整体中储存商品 0 的比例 m 的值。理论预期愿意接受商品 0 的概率不随 m 的增加而变化，但对商品 1 的接受概率则会随 m 的增加而减少。为了评估这些预期是否成立，我们同样计算遇到商品 0 的次数和遇到并接受商品 0 的次数，后者与前者之比是接受商品 0 的频率。我们也为商品 1 计算相同的接受频率。实验 A1-A3，B1-B3，C1-C3 的前半部分和后半部分的接受频率在表 7 中给出。与 Duffy 和 Ochs (2000) 得到的有关商品 0 的接受随 m 变化的产生混合结果和 m 增加对商品 1 的接受频率没有影响的发现不同，我们的实验发现提供了对理论预期的一些支持。在实验的经济中，愿意接受商品 0 的概率不随 m 的增加而变化，但对商品 1 的接受概率则会随 m 的增加而减少。

表 7 接受商品 0 和商品 1 的频率

实验序号	$m =$	愿意接受商品 0		愿意接受商品 1	
		前半部	后半部	前半部	后半部
A1	0.25	0.98	0.99	0.44	0.48
A2	0.25	0.97	1.00	0.42	0.47
A3	0.25	0.97	0.99	0.46	0.51
B1	0.33	0.98	0.98	0.38	0.45
B2	0.33	0.98	0.98	0.39	0.38
B3	0.33	0.97	0.99	0.39	0.48
C1	0.50	0.99	0.99	0.34	0.39
C2	0.50	0.98	0.99	0.38	0.29
C3	0.50	0.98	0.99	0.25	0.31

4.2 当商品 0 具有储存成本时观察到的行为

在实验 D1-D5 中我们使用了第 2 组参数，商品 0 的储存成本比商品 1 大但小于商品 2 和商品 3。

在这样的参数设置下，在商品 0 有价值的稳定状态中（我们这里所关注的），第 1 和第 2 类局中人分别总是愿意以其生产的商品 2 和商品 3 换取商品 0 或商品 1 以便减少他们的储存成本。持有商品 1 的第 2 类局中人不愿意用它换取商品 0，生产商品 1 的第 3 类局中人也拒绝用商品 1 换取商品 3 外的任何商品。因此持有商品 0 的第 1 类局中人只能先用商品 0 换取商品 3（投机交易），然后再用商品 3 换取商品 1 才能得到商品 1。在模型的这个版本中，对于第 1 类局中人来说用生产的商品 2 直接换取商品 3（另一个投机交易）也是稳定状态的最优反应，因此也迂回使用了商品 0。在两种情况中，第 1 类局中人一旦换取了商品 3，他就不会愿意用商品 3 换取商品 0。

表 8a 第 1 类主体愿意换取商品 0 的频率

实验序号	$u =$	第 1 类主体以商品 2 换取商品 0		第 1 类主体以商品 3 换取商品 0	
		前半部	后半部	前半部	后半部
D1	100	0.96	0.96	0.91	0.99
D2	100	0.91	1.00	0.95	0.95
D3	100	0.92	0.96	0.96	1.00
D4	100	0.89	0.98	0.92	0.92
D5	100	0.92	0.99	0.85	0.95

表 8b 第 2 类主体愿意换取商品 0 的频率

实验序号	$u =$	第 2 类主体以商品 1 换取商品 0		第 2 类主体以商品 3 换取商品 0	
		前半部	后半部	前半部	后半部
D1	100	0.03	0.03	0.93	0.96
D2	100	0.09	0.01	0.94	0.94
D3	100	0.02	0.02	0.93	0.98
D4	100	0.05	0.03	0.91	0.96
D5	100	0.04	0.03	0.92	0.97

表 8c 第 3 类主体愿意换取商品 0 的频率

实验序号	$u =$	第 3 类主体以商品 1 换取商品 0		第 3 类主体以商品 2 换取商品 0	
		前半部	后半部	前半部	后半部
D1	100	0.04	0.00	0.97	0.92
D2	100	0.02	0.00	0.94	1.00
D3	100	0.01	0.00	0.90	0.99
D4	100	0.01	0.05	0.94	0.98
D5	100	0.03	0.01	0.95	0.99

表 8a、8b 和 8c 显示了实验 D1-D5 的前后部分中每类局中人面临换取商品 0 的机会时实际愿意进行这样的交易的有关频率。与稳态预期相一致，第 2 类和第 3 类局中人几乎总是拒绝用商品 1 换取商品 0。然而，与稳态预期相反，实验中仍有极少数持有商品 3 的第 2 类局中人遇到商品 0 时拒绝交易。至于第 1 类局中人的行为，如表 8a 显示，从实验的前半部分到后半部分第 1 类局中人愿意用商品 2 和商品 3 换取商品 0 的频率有所增加，在实验 D2 的后半部分达到了预期的频率 1.0。同样与稳态预期相反，在绝大多数情况下持有商品 3 的第 1 类局中人遇到商品 0 时愿意用商品 3 换取商品 0。

最后，表 9a、9b 和 9c 报告了实验 D1-D5 中每类局中人愿意换取代币商品以外的不生产也不消费的商品的频率。这种情况下的稳态预期是第 1 类局中人将执行用商品 0 或商品 2 换取储存成本

更高的商品 3 投机策略，而第 2 和第 3 类局中人继续遵循基本的储存成本降低的策略。如表 9a、9b 和 9c 中所示，到实验的后半部分，只有很少的持有商品 0 的第 1 类局中人遇到换取商品 3 的机会时愿意进行交易。因此，大部分第 1 类局中人拒绝在这种交易情形下执行投机策略，尽管到了实验的后半部分几乎所有第 2 和第 3 类局中人都拒绝交易第 1 类局中人需要的商品 1 换取商品 0。比较来说，第 1 类局中人确实显示了预期的愿意通过交易商品 2 换取商品 3 投机，因为这种移动只会稍微增加他们的储存成本。面临换取商品 3 的机会的大多数第 1 类局中人展现的总行为模式是执行基本策略，除非他们换得商品 3 几乎不增加成本。

表 9a 第 1 类主体愿意换取商品 3 的频率

实验序号	$u =$	第 1 类主体以商品 0 换取商品 3		第 1 类主体以商品 2 换取商品 3	
		前半部	后半部	前半部	后半部
D1	100	0.27	0.01	0.55	0.56
D2	100	0.15	0.06	0.61	0.69
D3	100	0.26	0.04	0.57	0.78
D4	100	0.17	0.05	0.53	0.69
D5	100	0.18	0.06	0.56	0.47

表 9b 第 2 类主体愿意换取商品 1 的频率

实验序号	$u =$	第 2 类主体以商品 0 换取商品 1		第 2 类主体以商品 3 换取商品 1	
		前半部	后半部	前半部	后半部
D1	100	1.00	0.98	1.00	0.93
D2	100	0.99	0.98	0.95	0.98
D3	100	0.98	1.00	0.80	0.96
D4	100	0.98	0.99	0.90	0.98
D5	100	0.98	1.00	0.94	1.00

表 9c 第 3 类主体愿意换取商品 2 的频率

实验序号	$u =$	第 3 类主体以商品 0 换取商品 2		第 3 类主体以商品 1 换取商品 2	
		前半部	后半部	前半部	后半部
D1	100	0.12	0.15	0.02	0.00
D2	100	0.28	0.00	0.03	0.00
D3	100	0.24	0.31	0.02	0.00
D4	100	0.29	0.26	0.03	0.00
D5	100	0.18	0.03	0.03	0.00

表 9b 和 9c 显示在 5 次 D 实验中第 2 和第 3 类局中人都遵循预期的基本策略。具体来说，第 2 类局中人几乎总是愿意交易商品 3 和商品 0 换取储存成本最低的商品 1，第 3 类局中人不愿意交易商品 1 和商品 0 换取储存成本较高的商品 2。

5 结论

我们通过人工主体实验模拟了具有三种普通商品和一种代币商品的 Kiyotaki 和 Wright (1989) 货币模型。我们采用了两种不同的参数设计，希望看到主体对代币商品普遍接受的结果，并在一些参数值下得到主体对投机策略的选择，使模型可以很好的达到投机均衡，对这个货币理论模型的实验研究做出一些补充。事实上，在一系列相关实验中我们发现，无论代币商品是否具有内在价值，或者其储存成本是否最低，主体都愿意换取这种商品。实验结果指出，当所有类型主体的最好反应是执行基本策略时，如实验 A1-A3，Kiyotaki-Wright 模型的均衡预测基本实现。而对于投机策略，

第 1 类局中人确实显示了预期的愿意通过交易商品 2 换取商品 3 来投机，但我们另外期望的用商品 0 换取商品 3 的投机却未能出现。此外，我们的实验显示了与稳态均衡频率相同的商品 0 和商品 1 作为交换媒介服务的频率。与理论预期相同，代币商品商品 0 的可接受性对于商品 0 的供应不太敏感，具有内在价值的商品 1 的承兑性会随商品 0 供应的增加而减少。虽然，我们实验结果与 Duffy 和 Ochs (2000) 的发现有些差异。我们的发现更接近于理论预期的结果。但实验大体上仍可以进一步提供有关基于人工主体建模有助于对理解和设计人类主体实验的证据。

参考文献

- [1] Aiyagari, R. and Wallace, R. "Fiat Money in the Kiyotaki-Wright Model." [J]. *Economic Theory*, 1992, 2, pp.447-464.
- [2] Basci, E. "Learning by Imitation." [J]. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 1999, 23, pp.1569-1585.
- [3] Brown, P. "Experimental Evidence on Money as a Medium of Exchange." [J]. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 1996,20,pp.583—600.
- [4] Duffy, J. and Ochs, J. "Emergence of Money as a Medium of Exchange." [J]. *American Economic Review*,1999,4,pp.847-877.
- [5] Duffy, J. and Ochs, J. "Intrinsically Worthless Objects as Media of Exchange: Experimental Evidence." [W]. Pennsylvania US: Department of Economics, University of Pittsburgh, 2000.
- [6] Duffy, J. "Learning to Speculate: Experiments with Artificial and Real Agents." [J]. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 2001, 25, pp.295-319.
- [7] Duffy, J. "Agent-Based Models and Human Subject Experiments." [W]. Department of Economics, University of Pittsburgh, 2004.
- [8] Kiyotaki, N. and Wright, R. "On Money as a Medium of Exchange." [J]. *Journal of Political Economy*, 1989, 4, pp. 927—954.
- [9] Marimon, R. McGrattan, E. and Sargent, T. "Money as a Medium of Exchange in an Economy with Artificially Intelligent Agents." [J]. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 1990,14,pp.329-373.
- [10] Staudinger, S. "Money as a Medium of Exchange: an Analysis with Genetic Algorithms." [W]. Vienna Aus: Technical University, Vienna, 1998.

Intrinsically Worthless Objects as Media of Exchange: an Agent-based Experimental Approach

Zhang Shiwei, Luo Yin, Diao Linan

(Center for Quantities Economics Research in Jilin University, Changchun Jilin, 130012)

Abstract: This paper applies artificial agent based computational approach to understand and design the experimental environment of Kiyotaki-Wright monetary model with intrinsically worthless objects as media of

exchange. We model the behavior rules of artificial agent on the basis of the evidence of experiment with human agent. The focus of the experiment is on the role of token in this environment. Like Duffy and Ochs(2000), our findings suggest that there is some support for the theoretical predictions; in particular, we find that subjects nearly always offer to trade for the token object when such a trade lowers their storage costs. However, contrary to theory, we also find that subjects frequently refuse to offer to trade the token object for more costly-to-store goods when the theory predicts they should make such trades.

Keywords: Kiyotaki-Wright Monetary Model; classifier system; agent-based computational economics; token object

收稿日期：2005-01-12

基金项目：教育部人文社会科学基金规划项目（02J790026）

作者简介：张世伟(1964-), 吉林大学数量经济研究中心教授, 博士生导师, 研究领域: 经济模拟; 罗胤, 吉林大学数量经济研究中心硕士研究生; 刁莉男, 吉林大学商学院, 讲师。