# Improved Cooperation by Balance Exploration and Exploitation in Intertemporal Social Dilemma Tasks

摘要：当个体的行为具有理性特征时，对群体而言可能导致非理性的总收益。人类与许多群居特性的动物往往会进化出合作这一社会属性来应对这一挑战。因此，个体间相互合作对于群居生物适应自然环境的变化具有重要的意义。基于多智能体强化学习，我们提出智能体可以通过简单地调整学习率来权衡exploration和exploitation，就可以在跨期社会困境任务中形成合作。结果表明，个体内在需求的异质性促进了合作行为。

## 1 介绍

动物或者人类的群体行为结果不仅受到环境的影响，同时也会受到群体内个体行为策略的影响。比如，动物或者人类的迁徙会受到所处环境资源的影响，动物或者人类会倾向于向环境资源丰富的地方迁徙。同时，群体内个体从环境处获得的收益也受到群体内其他个体策略的影响，当群体内所有个体的策略都是往资源丰富的地方迁徙，那么处于该地的个体获得的收益会逐渐减少。这类问题就是所谓的跨期社会困境问题。对于处于跨期社会困境环境的群体而言，它们有可能陷入某种平衡状态，此状态下的群体总收益较少。个体在群体内往往存在不同的目标收益。为了在跨期社会困境情形下获得最优总收益，群体内的个体需要能在个体短期收益和群体长期收益之间进行权衡。通过每一个体仅获取自身需要的资源，来使集体达到最优长期收益。

多智能体强化学习能够模拟多个智能体在动态可变环境下的行为策略，目前已有许多研究发现多智能体强化学习可以模拟群体如何形成合作，从而在各类社会困境问题中获得最优解。这些模型往往通过内部奖励，来让智能体形成对群体理性的策略。内部奖励包括对不平等的厌恶、亲社会性和名声等，这些内部奖励将抑制智能体采取对群体总体收益不利的策略。比如，智能体厌恶不平等，当它发现自己的收益远远大于其它智能体的收益时，就会抑制其继续采用最大化其个体收益的策略。为了形成内部奖励，这些模型都假定群体内个体能获取群体内许多其它同伴的信息，从而形成个体的亲社会属性。然而，这些模型对于那些只能获取群体内极少同伴信息的群体，如鱼群和蚁群等如何形成合作的机制还难以给出合理的解释。

本研究基于Eric Charnov在1976年的边际价值理论，提出智能体可以通过简单地调整学习率来权衡exploration和exploitation，就可以在跨期社会困境任务中形成合作，从而获得较高的群体总收益。强化学习模型中，Exploration表现为智能体为了避免局部最优解选择当前不能获得最优奖励的动作，而Exploitation则是智能体选择当前能获得最优奖励的动作。为了在exploration和exploitation之间权衡，我们基于深度Q学习，提出了一个由个体阶段累积收益和目标收益之间的差值来定义的学习率，该学习率能根据环境收益通过在exploration和exploitation之间的切换调整智能体的策略，从而形成对群体总收益相对较优的个体策略。

## 2 相关研究

面对社会困境问题，智能体如何逐渐形成合作行为一直是社会科学、经济学和心理学等学科的重要研究问题。通过构建两个参与者交互的策略游戏，Komorita和Parks等（1995）发现，通过设定“担心”和“贪婪”两种策略的收益可以形成促使两个参与者形成合作行为。而进化动力学模型发现，针锋相对的策略（Axelrod 1984）、与直接给予自己帮助的人合作（Nowak 2006）、或者惩罚他人从而获得足够的回报（Fehr和Gachter 2002）都能促进合作的形成。以上研究尽管给出了形成群体合作的可能存在的因素，但没有给出个体具体的策略。

随着强化学习在解决诸如围棋和多人合作游戏取得的显著成果，已有许多研究者开始利用多智能体强化学习模型来研究群体如何形成合作的机制。通过设定智能体的决策任务和智能体形成合作所需要的策略参数，利用模型解释动物或者人类在形成合作行为时可能的策略参数。Sequeira等（2011）提出智能体通过探索内在动机来形成社会属性。Foerster等（2017）通过智能体对其它个体学习结果的建模，来让智能体在多轮囚徒困境游戏问题中形成合作。

Peysakhovich等（2018）发现当智能体更多关注其它个体收益时，能让智能体在Stag Hunt games中形成亲社会的策略。Hughes等（2018）将对不平等的厌恶融合进智能体内部奖励，从而在自己收益远大于群体内其它个体时或自己收益远小于群体内其它个体收益时调整策略，从而形成合作。Jaques等（2019）通过将个体动作对群体的影响转换为内部奖励，来让处于社会困境的智能体形成合作。Wang等（2019）提出进化深度强化学习，将其它个体过去和将来的奖励定义为智能体的内部奖励来进化出合作的策略。Khadka等人（2019）设计了一种方法来学习具有共享重放缓冲区的多种策略，并动态地选择最佳学习者从而逐渐进化出多智能体间的合作。Badjatiya等（2020）提出设计一个现状（Status-Quo）损失函数来让智能体尽量跟随现状，从而在社会困境环境中进化出合作行为。McKee等（2020）智能体在从具有异质性特征的群体内采样它们的奖励，可以让智能体获得亲社会的属性。Danassis等（2021）发现智能体通过在学习过程融合公共信号（如时间、日期等周期性数字）可以提升智能体的合作行为。以上模型一个共同的特征是智能体为了形成合作行为，都需要获取所有其他智能体的相关信息，这些模型对于那些只能获取群体内极少同伴信息的群体，如鱼群和蚁群等如何形成合作的机制还难以给出合理的解释。

由于环境状态的动态变化和不确定性，智能体要么只利用现有经验去行动，要么冒着当前不能获得较好收益的风险去探索环境，以期望得到可能更好的策略。因此，Exploration和Exploitation一直是强化学习中重要的研究主题。早期在求解多臂赌博机问题时，Epsilon-greedy、Upper confidence bounds和Boltzmann exploration等能在Exploration和Exploitation之间进行权衡从而获得最佳的总体收益。然而，现实的环境中由于奖励信号的稀疏特性以及环境状态存在的异常噪声，以上简单的探索策略并不能获得较好的总体收益。

一个较为通用的方法是设计一个内部奖励函数以便形成智能体的内部动机，从而通过诸如好奇心来引导智能体进行探索。好奇心包括发现了新的状态，或者提升智能体对环境变化估计的准确性等。这类基于内部奖励的探索策略有可能存在收敛速度慢，以及探索回报非平稳导致难以形成固定探索策略等问题。由此，发展出诸如基于记忆的探索策略，以及重采样Q值探索策略等从而避免基于内部奖励探索策略存在的不足。

对于多智能体探索的情形，不仅需要鼓励智能体探索新的状态和应对奖励信号稀疏的问题，也需要协同智能体之间的行动从而形成合作来对环境进行探索。Agogino和Tumer[2008]定义了在较小规模的状态空间，用于评估多智能体所获奖励功能有效性的方法。Jaques等人[2018]为多智能体强化学习定义了一个内在奖励函数，鼓励智能体采取对其他智能体行为影响最大的行动，从而获得协同的探索策略。Mahajan等人[2019]引入了一种实现“承诺”探索的机制，允许智能体探索临时扩展的共同策略。Wang等人[2020]定义了基于影响力的奖励，鼓励智能体访问其行为影响其他智能体转变和奖励的区域。最近，Iqbal和Sha（2021）提出了一类基于内部奖励的探索方法，该方法主要的特点是可以协同智能体之间的探索策略，并且能让智能体更好的获得总体收益。以上多智能体下的探索策略仍然需要智能体获取其他智能体的信息，对于只能获取少部分其他智能体，甚至不需要其他智能体信息下的探索策略还需要做进一步研究。

## 3 多智能体强化学习与决策任务

### 3.1 多智能体强化学习

我们将多智能体强化学习模型定义为一个四元组，它包括状态集合*S*、状态转移函数*T*、动作集合*A*和奖励*r*，即。在环境中有*N*个智能体，每个智能体能感知到的状态为，表示智能体*n*能观察到状态的*d*个维度，也就是智能体只能部分观察到其所处状态。环境中的每个智能体通过其动作*An*与环境交互，智能体的动作会引起环境状态的变化，变化由状态转移函数来刻画：，也就是环境中所有智能体的动作共同作用将环境状态从改变为另一状态。

每个智能体*i*根据其观察学习到策略，智能体执行动作后将获得奖励对动作结果进行评估。智能体的目标是习得一个优化策略，以便获得最大的长期收益。智能体的长期收益定义为：

公式1

其中，是取值0到1之间的折扣因子，表示收益函数，即智能体采取动作后的奖励。简化起见，记。对于智能体*i*，为了获得最大的期望收益，可以根据以下函数更新*Q*函数，

公式2

### 3.2 基于目标收益的学习率

我们考虑通过智能体的阶段累积收益和目标收益来定义学习率，学习率反应的是环境的变化对智能体策略的影响。为了达到这个目的，我们将阶段累积收益与目标收益的差值定义为学习率，即

公式3

是基础学习率，大小设置为0.001。目标收益是一个固定值，每个智能体都有一个目标收益，它反映的是智能体的满足度。也就是说，当目标收益较大时，智能体需要获得较多的累加收益才能满足。阶段累积收益是智能体在一段时间内的累积奖励值。如果智能体的阶段累积收益小于目标收益，表明这个智能体的目标没有达到，其表现出更多的Exploration。当智能体的阶段累积收益接近目标收益，表明智能体的策略达到了它的预期，其表现出更多的Exploitation。

根据以上学习率的定义，当环境处于稳定状态时，智能体的策略逐渐收敛，其学习率处于较低水平。当环境状态存在突变，智能体的策略要能很快适应这个变化，此时期学习率处于较高水平。

### 3.3 决策任务

根据Hughes等（2018）的资源采集任务，我们设计了一个类似的跨期社会困境任务。任务环境中包含两个价值不同的资源区域，即苹果区和垃圾区。环境地图大小*S*为12\*20个单位，垃圾分布在环境的上半部区域，苹果分布在环境的下半部区域。垃圾在其所在单位内以概率出现，环境中垃圾的数量记为。苹果在其所在单位内以概率出现，环境中苹果的数量记为。苹果的增长率与垃圾的数量呈负相关，其关系为:

公式4

其中是苹果的最大增长率，是地图中垃圾区域的一半大小。

环境中分布若干数量的智能体，智能体通过在环境中的移动，要么收获所在位置的奖励，要么清理所在位置的垃圾。智能体收获苹果的收益记为，而清理垃圾的收益记为。智能体的目的是获取最多的收益。在该任务中，各个智能体仅能感知其周围有限视野内的信息，智能体的视野范围大小记为。

该决策任务的困境如下，苹果和垃圾的增长相互影响。由于苹果的收益大于垃圾的收益，智能体的个体策略会倾向采苹果而非清理垃圾。然而，苹果数量的减少会导致垃圾数量的增加，从而抑制苹果出现的概率。因此，对智能体群体而言，需要一部分智能体清理垃圾，一部分智能体采集苹果，才能获得对整体而言最多的收益。

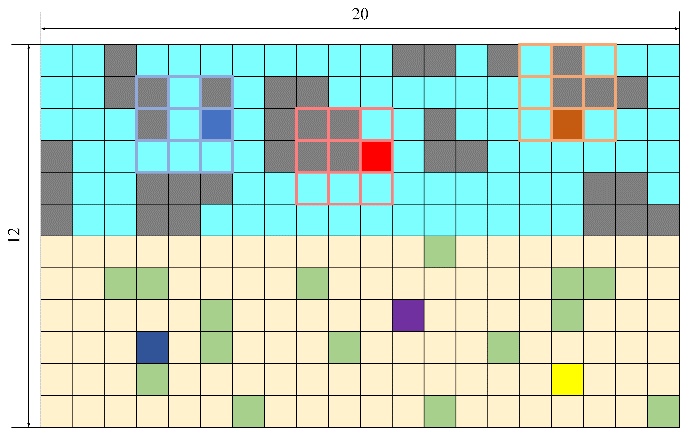


图1. 游戏地图

由于垃圾与苹果的生长并不平衡，多智能体在清理垃圾时清理视野范围内所有的垃圾，而采集苹果时只采集当前位置的苹果。因此，智能体清理垃圾获得的实际奖励为, 采集苹果获得的实际奖励为。决策任务中设定，表示智能体在时间跨度内的总收益。

虽然个体在策略任务中无法直接获取其他智能体的信息，但个体对环境造成的变化会影响其他智能体所观察到的信息。因此，还反映出了其他智能体间接地对个体在某一阶段内收益的影响。

仿真中，环境中随机放置了6个智能体，它们各自的学习函数见公式1。我们将地图中每个单元格的位置映射到区间内，其中表示垃圾区域内的单元格，表示苹果区域内的单元格。表示每个Agent在环境中的初始位置，且。每个episode任务中每一个agent共执行100步动作，然后重新安置Agents的初始位置。每组实验包括300轮episode，表1给出仿真中使用到的各个参数。

表1 参数

|  |  |
| --- | --- |
| **参数名称** | **描述** |
|  | 垃圾的增长率 |
|  | 环境中垃圾的数量 |
|  | 采集垃圾的奖励 |
|  | 苹果增长率 |
|  | 苹果最大增长率 |
|  | 环境中苹果的数量 |
|  | 采集苹果的奖励 |
|  | 智能体的视野 |
|  | 目标收益 |
|  | 累积收益长度 |
|  | 累积收益 |
|  | 智能体的初始区域 |

### 3.4 同质与异质性群体

我们根据智能体的，将的个体称为高目标收益者，将的个体称为低目标收益者。可在其范围内进行均匀随机取值，增加了群体的多样性。根据分布，将智能体群体分为同质性和异质性。同质性表示群体内的智能体均为高目标收益者(Homogeneous High)或均为低目标收益者(Homogeneous Low)，异质性则表示群体内同时存在高目标收益者和低目标收益者，仿真中的其参数设置见表2。

表2 Heterogeneous

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |  |  |  |  |
| Heterogeneous |  |  |  | 5 | 10 | 5 |  |
| Homogeneous Low |  |  |
| Homogeneous High | 0 |  |

## 4 结果

### 4.1学习率

我们使用阶段累积收益和目标收益定义学习率。本节将验证能促进群体形成更优的分工合作，并使用固定学习率与进行实验对比，参数设置见表3。图2绘制了群体分别在和固定学习率下的收益情况，并添加了基线结果作为参照。基线表示智能体随机选择动作。学习率为的群体总收益可以收敛达到2200~2500之间，而固定学习率的群体的总收益仅可以收敛到1300~1600之间。

实验结果证明了能够促进群体形成更优的分工合作。这是由于中的能够反应环境的变化，而环境的变化又到智能体行为的影响，因此能够间接体现当前受其他Agent策略的影响。进而提高了多智能体之间的间接互动性，更有利于促进群体有效合作的形成。

表3群体动态学习率与固定学习率的参数

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 学习率 |  |
| 固定学习率 | 0.001 |

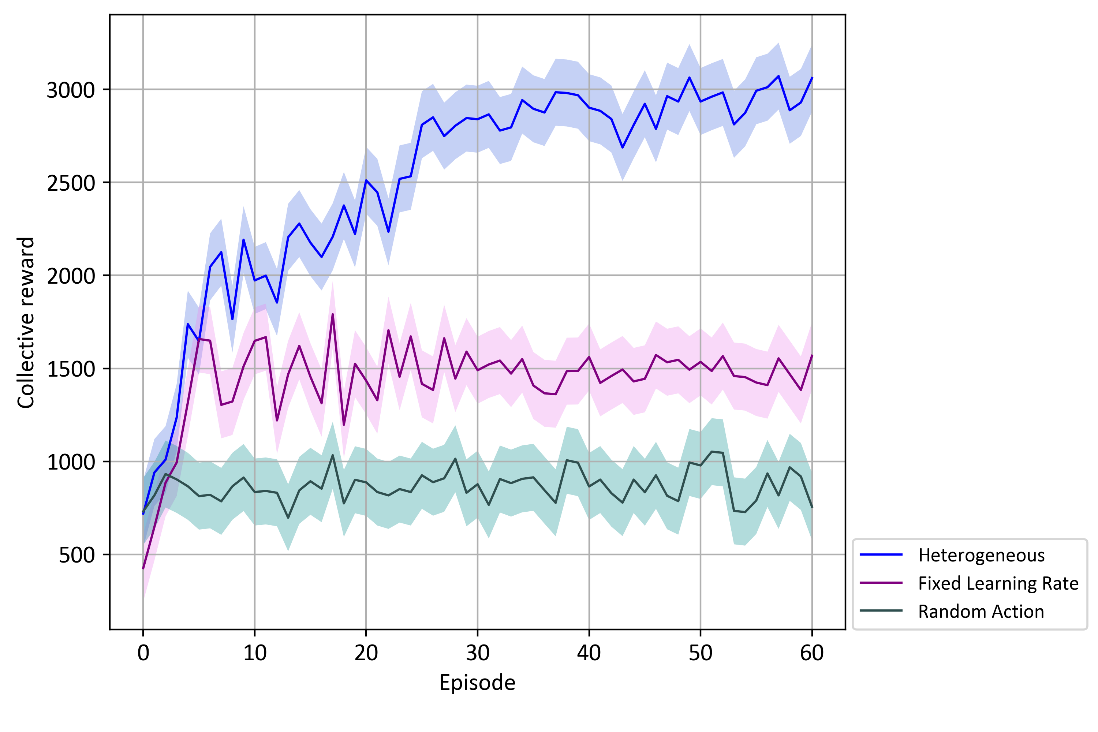


图 2. 动态学习率和固定学习率的收益比较

### 4.2 目标收益的分布

智能体按如公式3所示的学习率调整其策略，能形成群体的合作行为。影响智能体学习率变化的两个参数分别是阶段性收益和目标收益。本节我们将验证目标收益的不同分布对合作行为的影响，群体参数设置见表2。如图3所示，相比其他类型群体，Heterogeneous群体具有最高的总收益，总收益可以收敛达到2200~2500之间。Homogeneous High群体的收益为1400~1800之间， Homogeneous Low群体的总收益低于基线结果。

为了更清楚的表示每一个智能体在环境中的活动，我们在图4中画出每一个智能体在环境中的位置。完全随机选择动作的群体一直在Exploration，智能体间没有形成分工（图4 D）。Heterogeneous群体根据自身的目标收益进行Exploitation形成分工（图4 A）。这种分工会让部分智能体（低目标收益的智能体）在垃圾区采集垃圾，而部分智能体（高目标收益的智能体）在苹果生长区采集苹果，正是这种分布导致Heterogeneous群体的总体收益最高。当群体内每个智能体的目标收益都高，导致它们一直在环境中采用Exploration去获取高收益的苹果（图4 B）。而当群体内每个智能体的目标收益都低时，每个智能体都Exploitation（图4 C），从而减少了群体总收益。

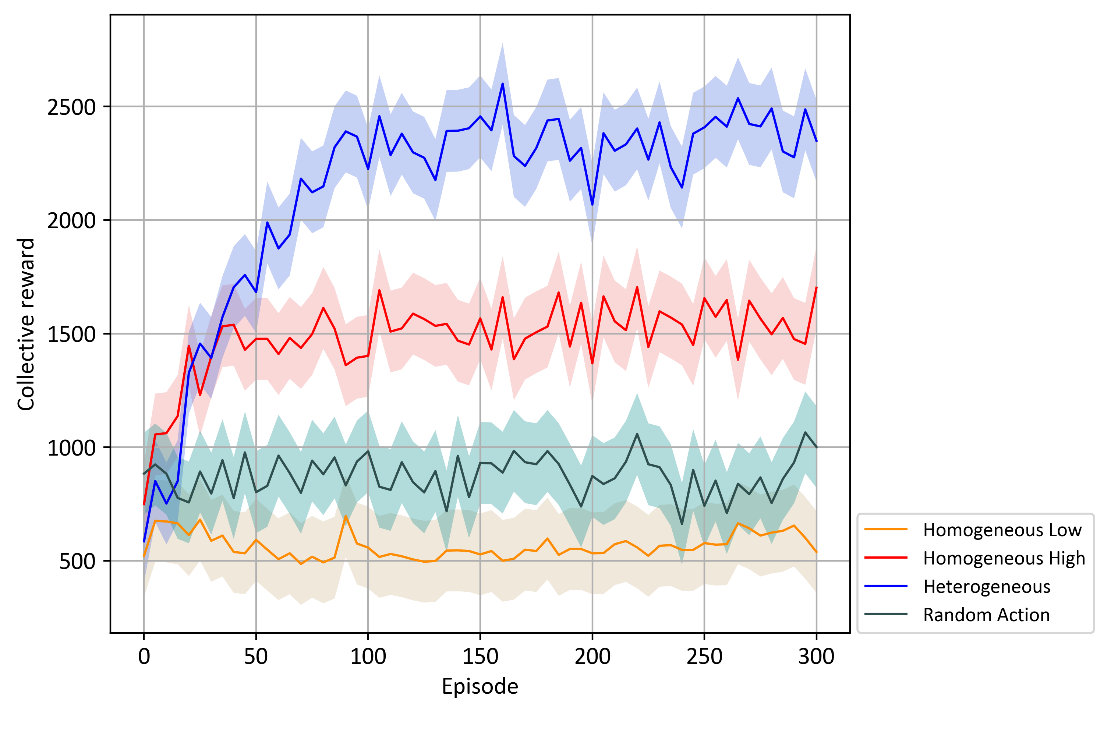


图 3. 个体异质性与个体同质性收益比较

1. Heterogeneous
2. Random Action
3. Homogeneous Low



1. Homogeneous High

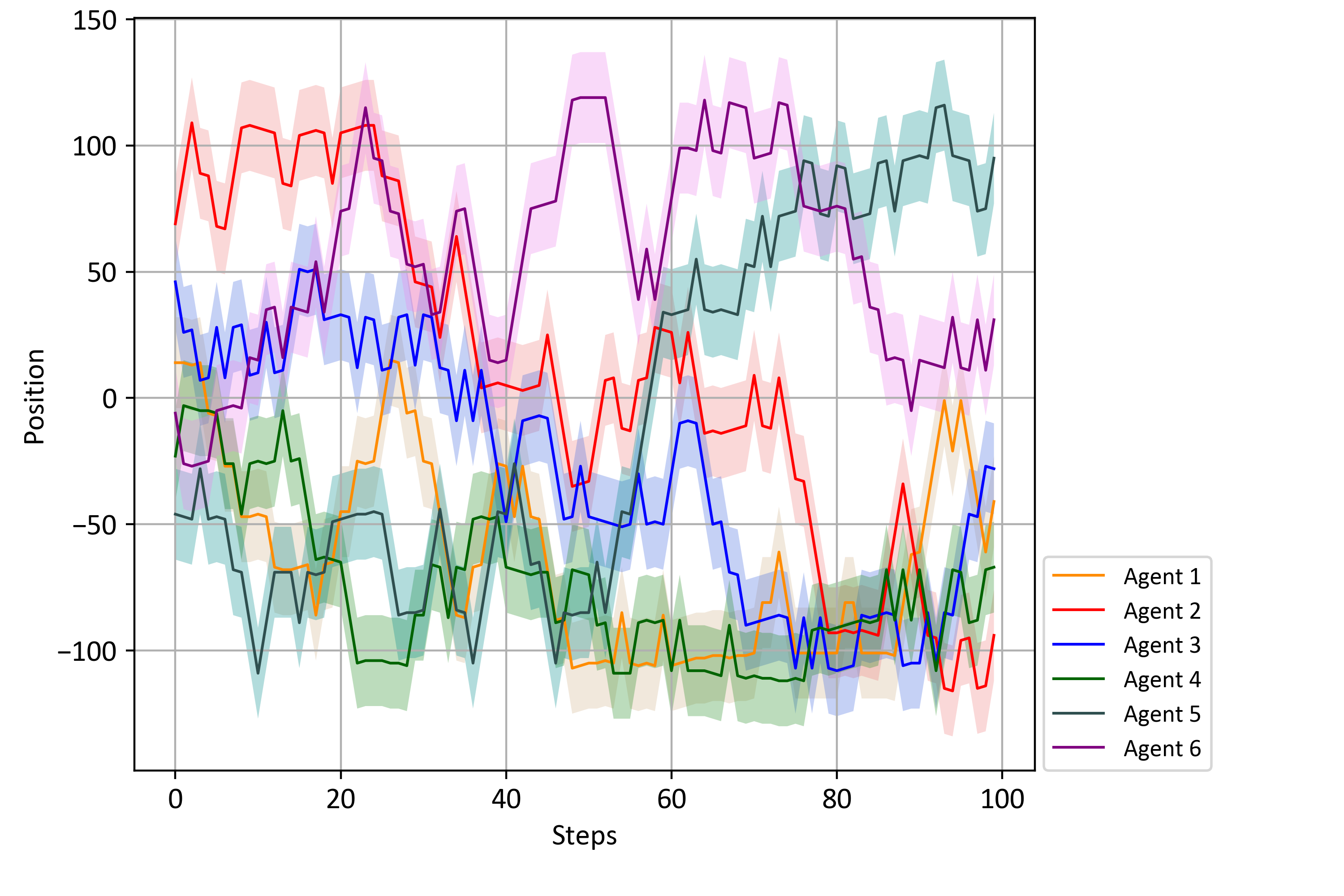
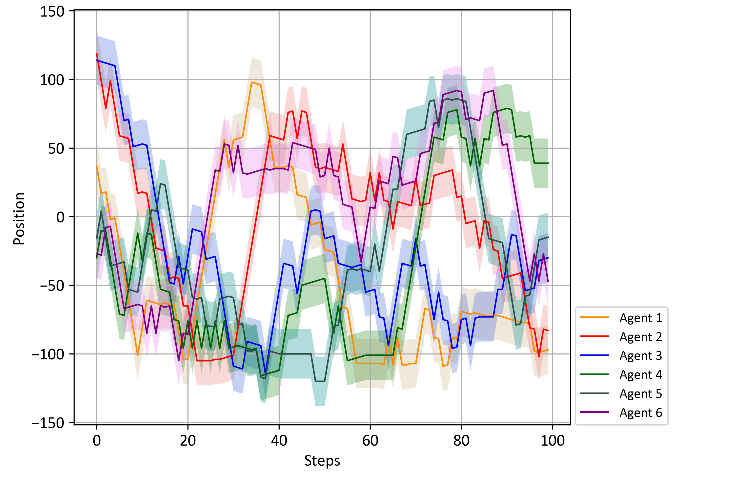


图 4. 异质性群体与同质性群体内智能体的活动对比

1. Homogeneous High
2. Random Action
3. Heterogeneous
4. Homogeneous Low

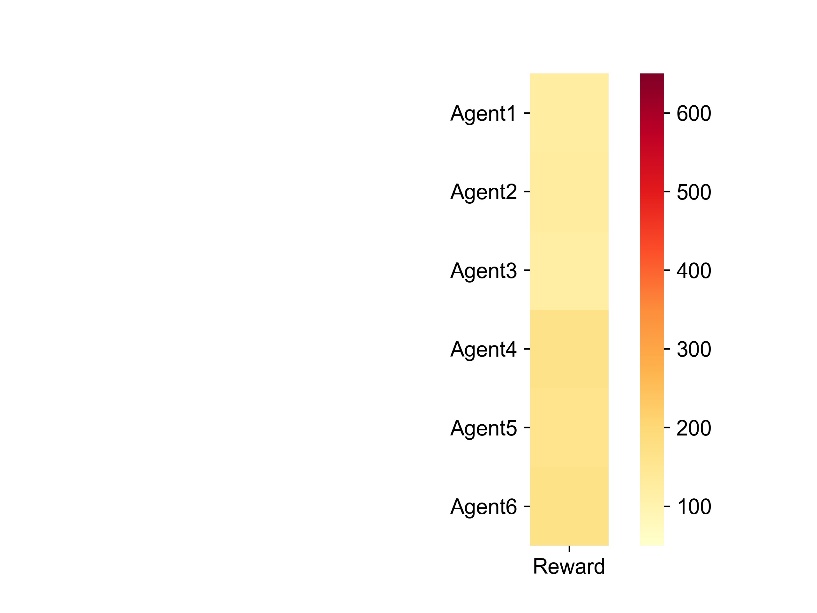
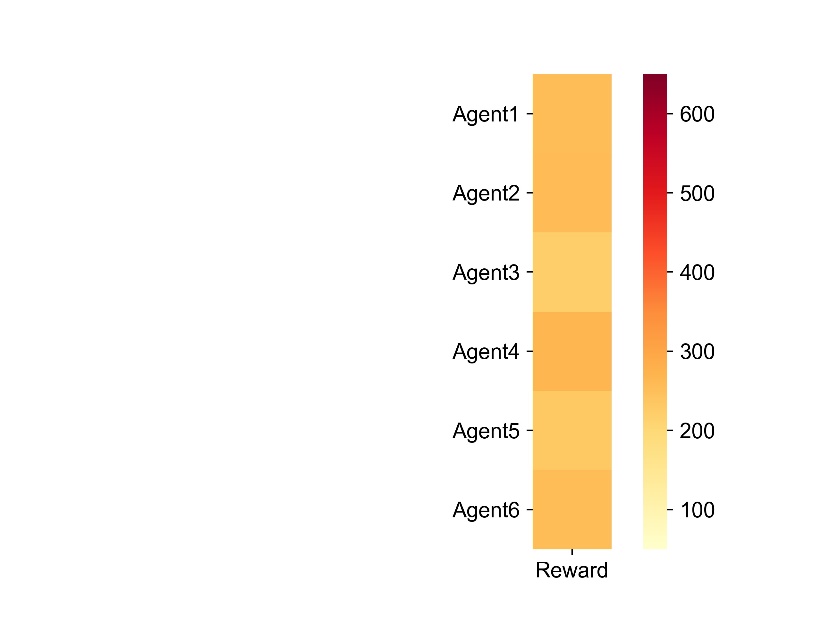
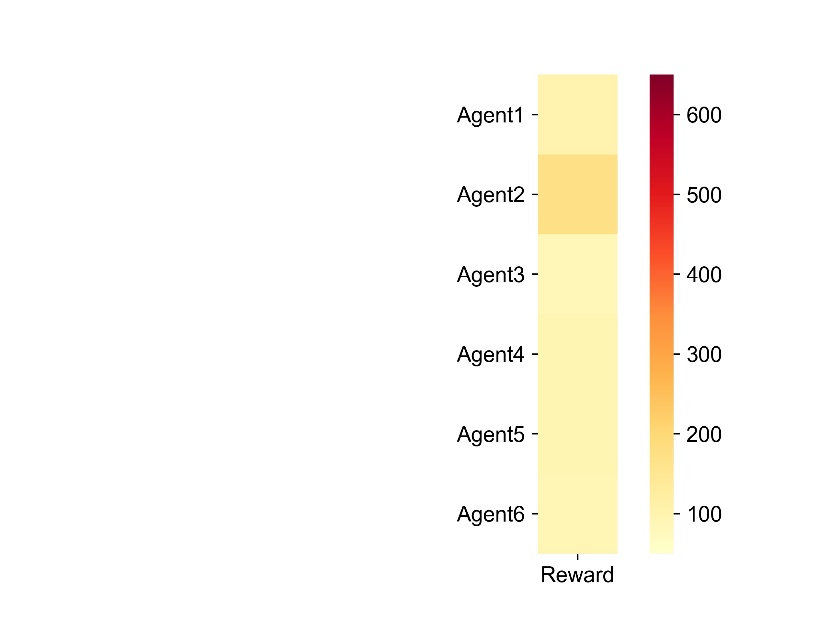
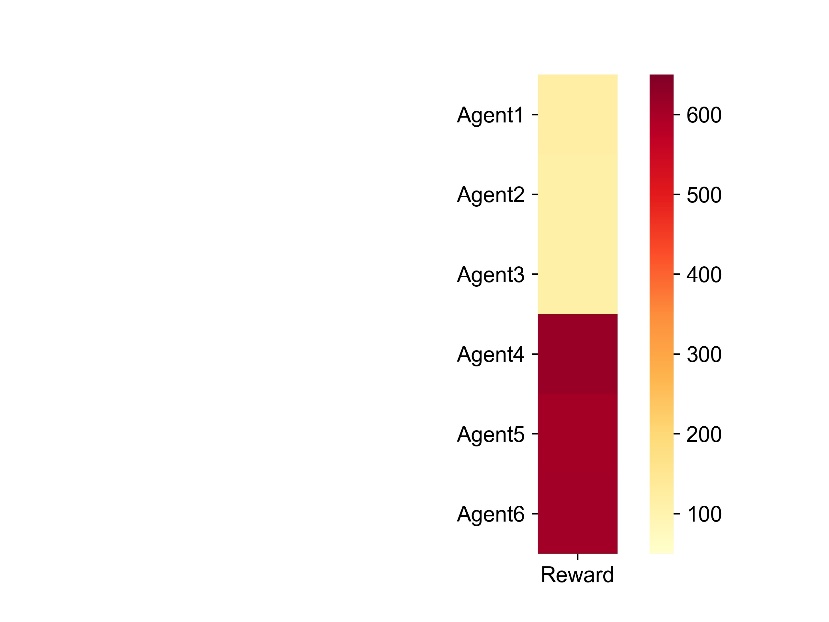


图 5. 不同群体内智能体的收益对比

如图5所示，对比了不同群体中每个智能体之间的收益，以便比较合作行为是否造成智能体间贫富差距。结果表明，相比较于同质性群体内收益差值，异质性群体间收益差值最大。这表明尽管异质性特征尽管促进了群体内智能体间的合作行为，但也会导致群体内个体间贫富差距变大。

4.3 阶段累积奖励

我们使用Heterogeneous群体作为实验对象，将探究不同的阶段累计长度对群体合作行为形成的影响。如表4所示，随着的不断增大，群体的总收益不断下降；当的取值过小，智能体总体收益同样较小。当的取值较大时，导致智能体难以感知环境的变化，从而降低其采用Exploration的可能性。当的取值较小时，智能体紧紧关注当前收益，同样难以感知环境变化，从而使得智能体频繁采用Exploration。

表 4 Heterogeneous群体在不同下的总收益

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | Episode |  |
| *1* | *300* | *1950~2135* |
| *2* | *2000~2250* |
| *5* | 2200~2500 |
| *8* | 1350~1600 |
| *11* | 900~1200 |

### 4.4 智能体的初始位置

我们之前讨论了智能体的内部因素对群体合作形成的影响。接下来，我们将研究智能体在环境中的初始位置对其群体合作形成的影响。我们使用Heterogeneous群体作为实验对象，将智能体分别置于环境中的不同位置，表5描述了智能体的任意位置信息。

如6所示， 无论Heterogeneous群体内的智能体在任意初始位置都可以形成分工合作。当智能体被放置在与自身目标收益匹配的资源环境时(Random location-1)，多智能体很快就能形成分工合作。当智能被放置在与自身目标收益不匹配的资源环境时(Random location 2-4)，智能体经过一段时间的Exploration也能够找到适合自身需求的资源环境。

表5 Heterogeneous群体的初始位置

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |  |  |  |
| Random location-1 | 28 | 1 | 25 | -115 | -20 | -24 |
| Random location-2 | -92 | -87 | -46 | 60 | 63 | 45 |
| Random location-3 | -18 | -110 | -89 | -24 | -26 | -28 |
| Random location-4 | 48 | 27 | 23 | 24 | 95 | 107 |

Random Location-4

Random Location-3

Random Location-2

Random Location-1

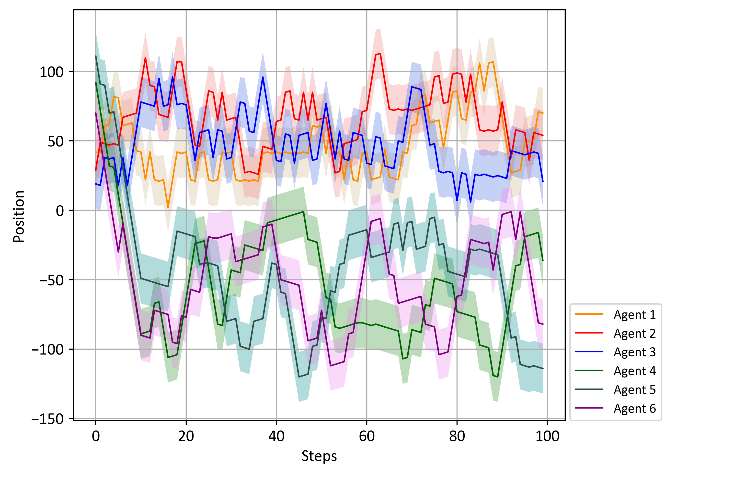
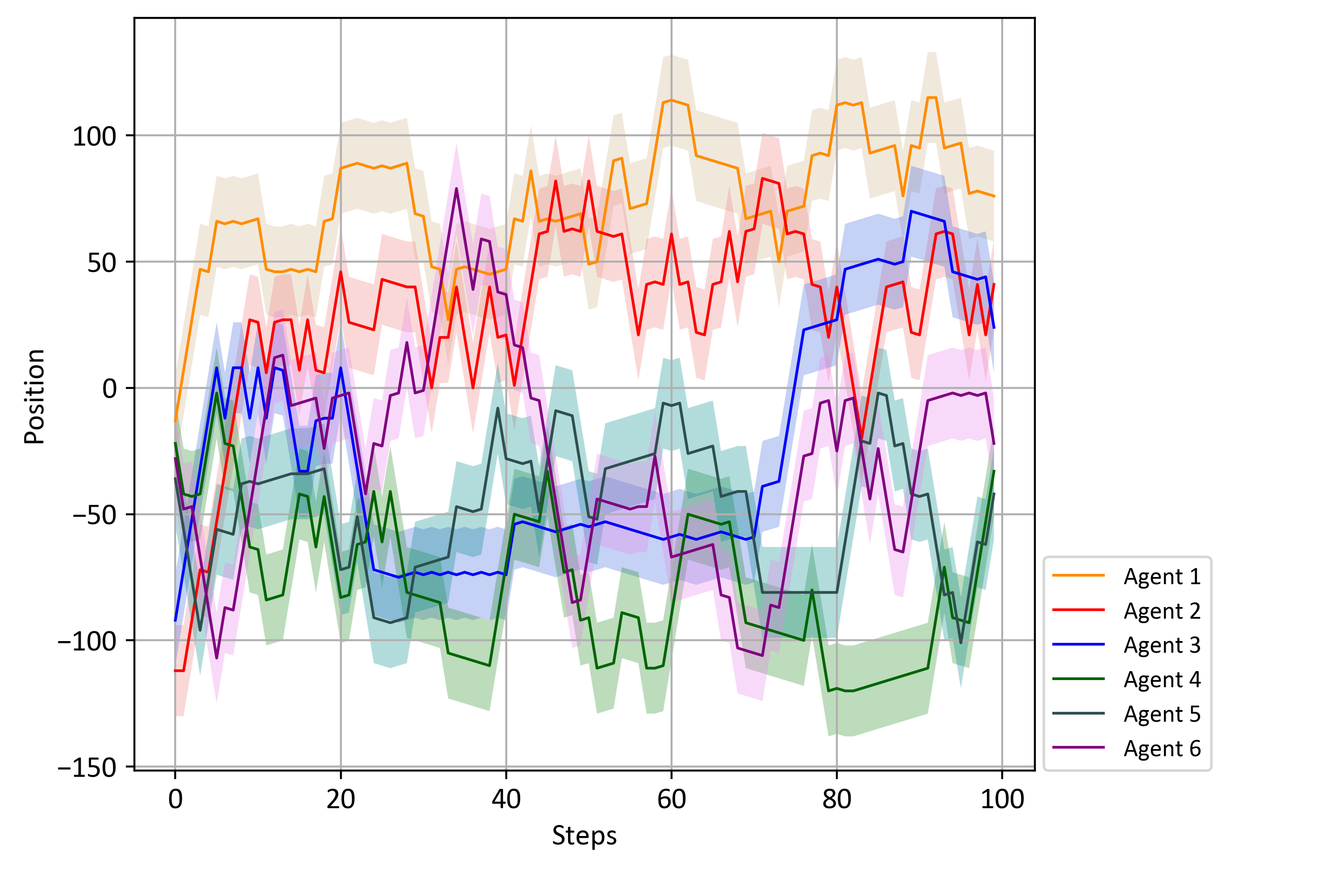
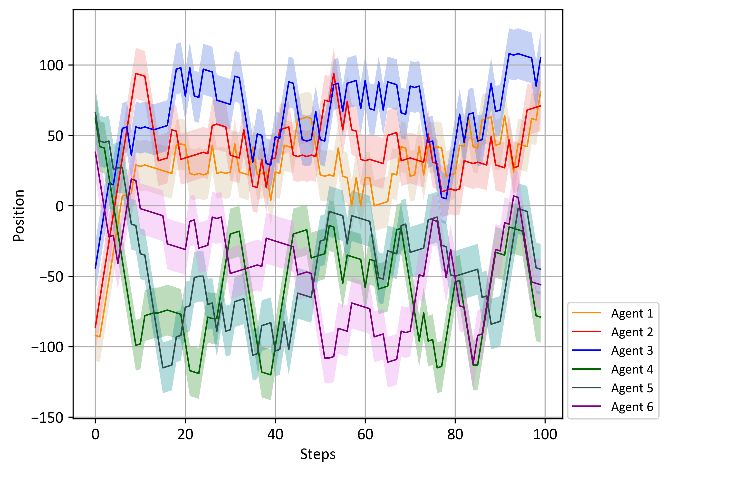
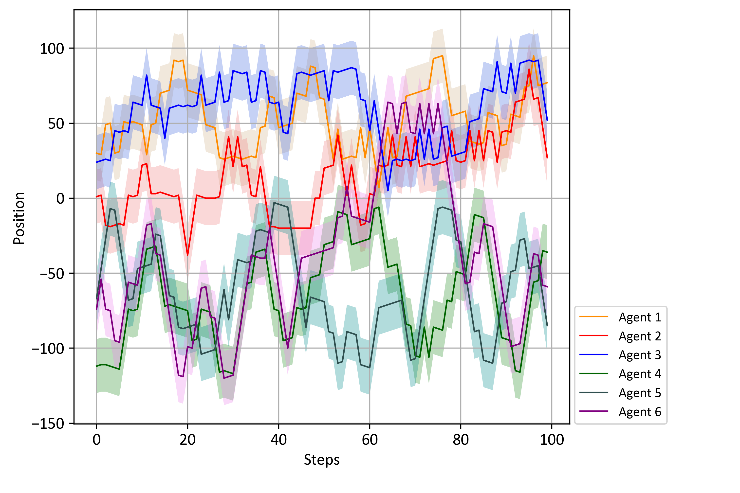


图 6. 不同初始位置对异质性群体内智能体的活动影响

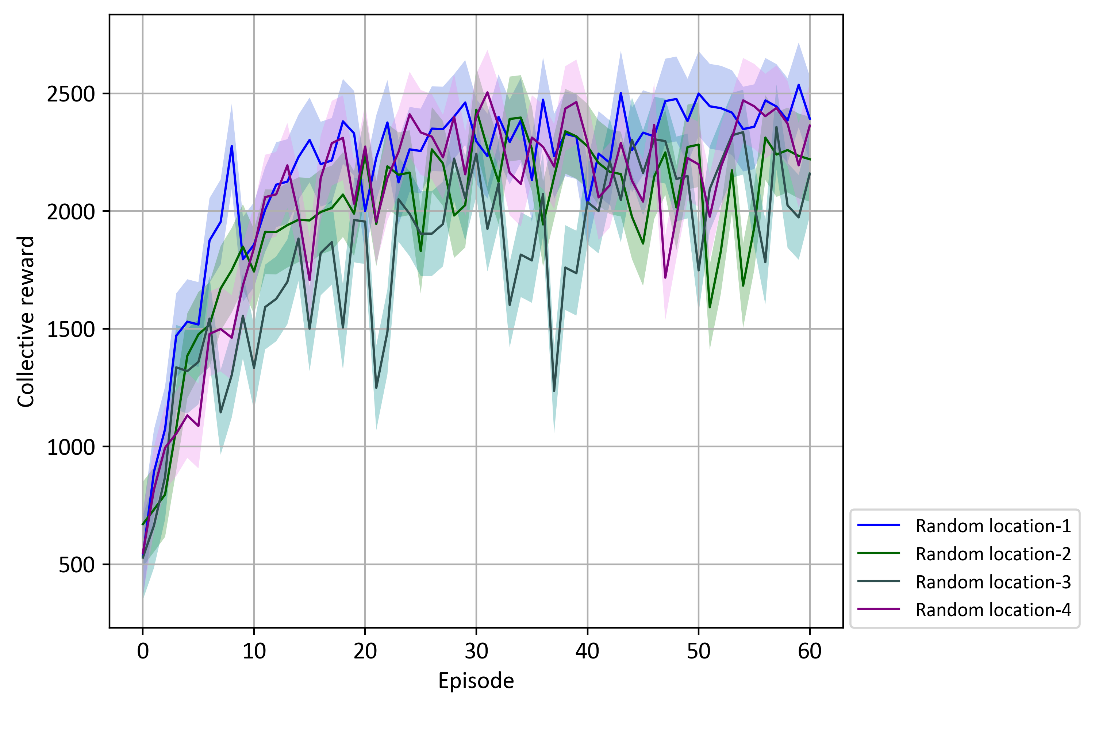


图 7. Heterogeneous群体在不同初始位置的收益比较

如图7所示，Heterogeneous群体在不同初始位置所取得的总收益并没有明显的差异。无论个体的初始位置在任意位置，群体总收益都可以收敛到最优点附近。说明个体内在需求的异质性是群体形成分工合作的关键因素，它促使智能体通过Exploration仅去采集满足自身需求量的资源，进而形成群体的分工合作。

## 5 结论

基于边际价值理论我们提出了一个通过平衡利用-探索，从而在跨期社会困境中多智能间形成合作的方法。面对跨期社会困境问题，智能体只需要计算在一段时期内的收益，而不需要从其他智能体获取额外的信息，就可以形成类似合作的行为。我们的结果表明，智能体间的异质性，如各个智能体的目标收益的异质性，是形成合作行为的关键。这个结论与McAvoy等（2020）和McKee等（2020）最近的研究结果类似，他们发现智能体连接数量的异质性和社会偏好的异质性，能促进智能体社会行为的形成。我们的研究结果进一步揭示，其它类型的异质性，如本文设定的各个智能体目标需求的异质性，也能促进智能体间合作行为的形成。在此基础上，我们推断也许还存在其它可以促进智能体形成合作行为的异质性参数，这一点值得后续更为深入的理论与实验研究。

我们的结果同时还表明，对于跨期社会困境问题，形成智能体间合作的策略还与智能体的初始位置分布没有必然的联系。智能体在任意的初始位置都可以通过Exploration提高对环境的认识，动态学习率会使智能体调整自身的策略达到最优的Exploitation，进而形成群体的分工合作。

我们研究的一个主要不足之处在于，设计的智能体学习算法并没有考虑智能体间直接的互动和交互。智能体间通过一个时间段内总收益来产生相互的影响。对某个智能体而言，如果群体内的其它智能体行为都是非社会性，那么这个智能体一个时间段内总收益就会变少，这会引起该智能体根据其自身的目标收益来调整利用和探索策略。也就是说，其它智能体的非社会性行为间接引起了该智能体策略的变化。相似地，如果群体内的其它智能体行为都是亲社会性，他们的行为也会间接引起了该智能体利用和探索策略的变化。我们将在后续研究考虑，在算法中增加智能体间交互的参数。

需要特别指出，我们只是在跨期社会困境中验证了智能体通过调整利用与探索策略来形成合作，对于其它类型的社会困境问题能否得到同样的结论还需要进一步的验证。