

应急疏散动力学研究的意义与进展

汪秉宏¹ 周涛² 史冬梅³

(1 中国科学技术大学近代物理系 230026; 2 电子科技大学互联网科学中心 611731;

3 渤海大学物理学院 121013)

1. 应急疏散问题的提出

中国大陆的城市发展已进入快速增长期, 城市规模迅速膨胀, 高层、大型建筑物日益增多, 人员高度密集, 在开放场合和建筑物内的以过度拥挤踩踏等为代表的非常规突发事件的危险性和危害性日益严重, 使得大陆公共安全面临严峻挑战。例如 2014 年 12 月 31 日, 因很多游客市民聚集在上海外滩迎接新年, 上海市黄浦区外滩陈毅广场东南角通往黄浦江观景平台的人行通道阶梯底部有人失衡跌倒, 继而引发多人摔倒、叠压, 致使拥挤踩踏事件发生, 造成 36 人死亡, 49 人受伤。而 2015 年在麦加圣城发生的踩踏事故, 造成了 2000 多人遇难, 更是给人口密集的中国公共安全敲响了警钟。

大量集中的人群也使得其他灾害, 例如火灾地震发生时的应急疏散变得非常困难。除此之外, 日益严重的国内外反恐形势使得如何紧急应对可能的恐怖袭击, 成为迫在眉睫的重大安全问题。深入挖掘密集恐慌人群的行动规律, 对可能引发的拥挤骚乱甚至践踏事件形成有效的预警和干预机制, 对恐怖袭击或突发灾害后的人群疏散形成完善的硬件支持和高效的现场疏导策略具有重大意义。

应急安全疏散必须保证所有人员在可利用的安全疏散时间内, 均能到达安全的避难场所, 而且疏散过程不会由于长时间的高密度人员滞留和通道堵塞等引起群集拥挤、踩踏、伤亡等事故。尽管研究者不断找寻缓解应急恐慌引起的灾难性伤亡的措施与方法, 可是灾难发生的频率和强度近年来还是在不断增长。一方面, 具有严重公共危害的恐怖袭击事件不断发生, 大量受袭恐慌人群可能在逃离现场时发生严重的拥挤踩踏事件; 另一方面, 系统分析恐慌行为和预测恐慌行为发生的

量化理论匮乏, 也是该类灾难很难有效缓解的重要原因。正是由于该领域研究的特殊性、复杂性和重要性, 最近数十年来, 人类应急行为分析问题引起了越来越多的人类行为科学家的关注。他们总结了应急恐慌行为的一些规律, 并取得了不少令人瞩目的成就。其中比较具有代表性的是群集动力学权威学者瑞士苏黎世的赫尔宾 (D. Helbing) 教授和匈牙利布达佩斯的维克 (T. Vicsek) 教授在研究紧急情况下的恐慌行为特征模型。主要包括: 逃生个体希望以比平时更快的速度逃离, 人群显示出一种从众的行为, 个体之间开始进行身体接触, 相互摩擦甚至挤压。恐慌人群经过逃生通道瓶颈时的竞争动态变得极不协调, 因此在出口处易出现拥挤, 而这种拥挤会使得人群之间相互挤压的力量迅速增大, 将出口堵塞。另外, 受恐慌情绪下的盲目从众行为影响, 灾害逃生时经常出现一个出口拥挤不堪, 而另一出口却几乎无人通过的低效率现象。因此, 应急恐慌人群行为具有相当大的优化空间, 而研究人类应急行为中的确定性和随机性规律, 以及竞争与协作机制, 并据此探索紧急疏散模型, 设计有效的疏导和干预方法, 有助于尽量减少群体恐慌行为所造成的经济损失和人员伤亡, 对改进各国现有的非常规突发事件应对策略具有十分重要的战略价值。

恐慌被认为是在生存资源缺乏时所激发的一种特殊的群体行为。从 20 世纪 90 年代开始, 随着恐慌心理行为分析和生命群集动力行为研究的深入, 研究越来越侧重于融合心理特征的动力学综合行为分析。然而其整体水平依然较低, 并未形成人为干预设计策略的指导性结论。为达到应急疏散要求, 各国都设计了一些基本的保障和干预措施。但是应该注意到, 安全疏散策略的设计是与建筑物结构特点、管理水平、安全设施、人员状态及其行为特点等因素密切相关的。

其中，尤以人的心理状态和行为特点为其中最难量化分析的因素，也就成为本领域研究的核心难点。另外一个重要的不足是相关方面理论模型的研究较多，而实际观测数据的积累与分析较少。为了最终实现在人员密集区域通过一组摄像头的监控，对过度拥挤或者疏散不当的人群进行自动监控、报警和提示，需要非常高效的视频信号实时分析处理技术。这种工程科学上的困难，很大程度上制约了理论研究人员把研究成果运用到实际系统中。

2. 群集运动的统计力学模型

应急疏散行为的研究，实质上是人类群体在恐慌情况下的动力学行为研究，是自然生命群体行为分析的一部分。因此，生命群集动力学领域的迅猛发展，已不断为应急领域研究注入了新的活力，并已逐步成为应急疏散行为研究的主流手段。鸟群、兽群、鱼群、昆虫群、细菌和病毒种群等群集行为的有趣之处在于个体或局部的低等行为能够构建复杂而和谐的群集动态行为。即使频繁添加或删除某些个体，或遭受到障碍物和捕食者的侵袭，群集的动态特性依旧不受影响。其核心问题就是群集中不同个体之间如何进行局部的交互和协作。以维切克，莱文，库赞，赫尔宾等为代表越来越多的生物学家、物理学家、数学家、计算机学家和系统控制理论专家试图理解鱼群、鸟群及其他动物群体在没有全局信息与中央控制的情形下如何达到运动方向的一致，进而进行迁徙、栖息、觅食等复杂的群体活动，并将其应用于人类应急疏散群体行为分析和人为干预策略设计的前沿领域。

具体来说，自然界生命集群中一般存在着两种平衡且相互对立的行为：（a）避免与相邻的个体发生碰撞；（b）期望向邻近个体的中心靠拢。雷诺尔兹（C. Reynolds）按照这些生物集群的特点较早地对生命集群行为进行了计算机仿真，并提出了著名的包含分离、校准和靠近三个基本规则的 Boid 模型，成为了后续研究的典范。Gazi 和 Passino 基于 Boid 模型的分离和靠近规则设计了吸引 / 排斥函数模型。利用该模型，他们证明了随机分布的个体会在有限时间内形成一个环，并给出了其半径的上确界。另一方面，维

切克等从统计力学的角度对集群行为中的聚类与相变行为进行了研究。Vicsek 模型的有趣结论是，当集群的密度较大且噪声较小时，如果每个个体选择邻居的平均运动方向为其运动方向，则群体的运动方向将达到一致。该现象引起了数学家和系统科学家的极大兴趣，他们试图对该模型的一致性行为给出严格的理论分析。Jadbabaie 等人研究了 Vicsek 模型中的线性化角度更新方程，证明了当这些个体按照某种“一致”的方式联合连通时，系统将会同步。更具一般性的模型由普林斯顿大学库赞等提出，该模型综合了吸引 / 排斥函数模型和 Vicsek 模型的特点，设计了从远到近的吸引、校准和排斥三个环形区域，该模型对蜂拥、涡旋和迁徙这三种最典型的群集行为的形成原因给出了合理的解释。

除了对群集行为描述方法进行深入探索之外，更多的学者开始研究个体或局部行为对群集整体行为的影响。库赞等的研究指出，群集规模越大，需要知道群集目标的个体所占比例越小；在最新的生物学实证领域，巴莱里尼（M. Ballerinni）等人指出，邻域并不是按照欧氏距离划分，而是按照拓扑距离划分的，无论群集密度如何，个体只有固定数目的邻居，这样对于障碍物和外界攻击具有更好的鲁棒性。这项生物学重要发现也有望被引入应急疏散干预策略中，防止人群被障碍物冲散掉队，减少无序行为的发生几率。

中国科学技术大学汪秉宏、电子科技大学周涛和华中科技大学张海涛联合研究小组，提出了一系列群集编队控制的优化方法，例如通过实时调整运动速度、通过缩小视野范围以避免过多信号的干扰、通过避免距离过近导致的碰撞、通过模拟实验探讨在有限资源下如何编队才能实现以少数人带动多数人的效果等。其中很多算法的思路，都受到了真实生物体群集运动行为的启发。例如鸽子或者椋鸟在编队飞行的时候，不管是头鸟还是群体中处于一般位置的鸟，视野都只能局限在以前进方向为中心的一定角度内，就好像人在往前奔跑的时候不可能看到身后的事物。与此不同的是，在 Vicsek 模型中，一个个体可以感知周围 360 度的所有其他个体。汪秉宏、周涛等人发现，当我们限制运动个体的视野范围的时候，反而能够提高编队

的效率。

张海涛和周涛等人注意到，动物对于运动轨迹具有很强的预测能力。事实上，如果没有了这种预测能力，一只训练有素的狗就不可能跳起来咬住正在飞行的飞盘，而“中国式的横穿马路”更不可能发生，因为我们毫无疑问很快就会丧生在疾驰的车流中。基于此，张海涛和周涛等人提出了个体可以针对拟跟踪目标的移动轨迹，对拟跟踪目标将来出现的位置进行预测，然后以预测后的位置为基准，调整和优化自己的移动速度和移动方向。这种方法可以非常显著地提高群集编队的效率和鲁棒性。

2010年，维切克等人在《自然》上发表了一篇实验论文，对自己提出的，群集运动方面最具盛名的Vicsek模型提出了质疑！他们通过对十几只鸽子的精密飞行轨迹（通过在鸽子脚上捆绑GPS设备）进行跟踪，发现鸽子在飞行时存在一种“领导-被领导”的层次网络结构——这种有点中国官僚特色的鲜明的层次性结构，可能是高效形成集群的原因。2014年，阿塔纳西宾(A. Attanasi)等人在《自然·物理》上发表了他们针对上千只椋鸟做的不可思议的大规模试验，指出层次结构还是很重要的，特别是在信息快速传播方面。当然，虽然阿塔纳西宾等人实验规模大，但是在个体分析方面受限于实验的精度，比较粗糙。同年，张海涛、周涛和维切克小组一起，对鸽子飞行的数据进行了进一步的分析，他们发现，鸽子在飞行中实际上混合了“听领导的”和“听周围朋友的”这两种策略。就运行方向而言，当飞行轨迹平滑的时候，鸽子尽力与周围邻居的平均方向保持一致；而当出现突然的急转弯变向的时候，鸽子迅速和领导保持一致。在决定飞行速度的时候，周围邻居对鸽子的影响一直都比领导大。鸽子的复杂飞行策略和人类的一些处世方式有类似之处——太平盛世的时候我们与社会中相近的个体比较，并且希冀倡导自由、民主并推崇个体价值的政府，但是当战乱或者紧急事件发生的时候，我们还是盼望强有力的领导。

3. 应急疏散动力学行为研究

根据人流密度的不同，应急疏散动力学行为可

以分成自由和拥挤两个阶段。在自由阶段，人员密度和相互约束均较小，人员可以主动规划自己的疏散路线和行为，对行动速度和目标等进行调整。这一阶段的人员行为呈现出很大的随机性和主动性。在拥挤阶段，人与人之间的间距变小，疏散人员呈现出“蜂拥”(swarm)特征，个人意志对整个人员流动的影响几乎可以忽略，整个疏散行动呈现连续向目标出口的流动状态。疏散动力过程包含表示当前和最终行为的目标变量，表示疏散运动速度和疏散通道流动能力的行动变量和表示人员之间和人员与障碍物和不良环境之间的约束变量。而人为干预行为要满足目标规则和约束规则，前者要求人员不断尝试保持最优运动方式，向既定的安全目标移动，后者使运动受到的约束和障碍程度最小。一般来说，如何避免或处理滞留现象是成功疏散的关键。滞留群体容易出现在造成流速下降的空间断面收缩处、加宽处或转向突变处，如：出口、楼梯口等。如果不能迅速处理滞留现象，让滞留持续时间拖长，则滞留人员可能由于恐慌争相夺路出现混乱。在出口附近形成拱形人群，大部分时间难以通过，并呈现出雪崩状的间歇式涌出现象，从而导致过度挤压和踩踏等危险。

目前国内外对于应急疏散动力行为的研究方法分成观测实验手段和计算机数值模拟两大类。前者主要是试图从观测数据中总结人员疏散流动的基本规律，以英国的Fruin，前苏联的Predtechenski和Milinski以及日本的Togawa为代表。这些研究得到了大量有关人员行动能力以及建筑物出口的流动系数等观测数据，据此设计了确定人员流动速度和建筑物疏散通道的数量和宽度的方法，用以指导建筑物防灾设计规范的制定。

对于非灾害引起的人群拥挤践踏事故，最具代表性的是巴蒂(M. Batty)等人提出的人群运动心理模型和相应的对伦敦诺丁山狂欢节期间人群流动的实际观察、数值模拟和疏导策略研究。通过加设隔档、封闭路段、限制入口人数等策略，可以有效减少某些特定区域的过分拥挤。另一方面，计算机应急疏散模型的典型代表是英国格林威治大学的欧文(R. Owen)等和爱丁堡大学的汤普森(R. Thompson)等开发的运动、行为和风险评价三种模型。运动模型首

先构造网络，将出口和通道交点作为节点，将节点间的物理通道作为边，将所有疏散人员作为一个整体。运动模型运行速度较快，适合于人员密度大，疏散人员无法根据自己的行为特点自由进行决策和疏散行动的场所，但它对局部运动的细节描述和疏散空间的障碍表达存在一定困难。典型的运动模型有 Evacnet+, Magnetmode, Takauashi's model 等。行为模型主要考虑个体在疏散中对于路径的探索和感知、认知决策的表示，如 Exodus, Simvles 等。然而，即使在同样的环境状态下，不同疏散人员的决策仍可能存在很大的差异。因此，行为模型的准确性很大程度上取决于模型中行为规则知识库的完善程度以及逻辑推理的科学性。风险评价模型主要用来研究灾难中人员疏散行为的危险性，包括对疏散中危险性的识别、量化和对火灾疏散中一些重要的变量进行评价，如 Crisp, Wayout 等。

在国内，中国科学技术大学的火灾国家重点实验室，公安部四大消防研究所都做了大量的实验研究和数值模拟，取得了较有价值的成果。然而由于应急疏散涉及人的行为，非常难以量化，目前大部分研究还是定性分析，如：蒋久琨等关于超高层建筑的避难层设计，李章盛关于烟气控制与疏散通道涉及的探讨，温丽敏、陈宝智等就化学品泄露事故时社区范围紧急疏散的原则和应急方案研究，宋卫国等就出口条件与疏散人员流量的关系分析，方正、陆君安和卢兆明的人员疏散网格模型 SGEM 和逃生速度模型等。在应急疏散交通流仿真方面，万庆和厉惠国将地理信息技术和计算机技术相结合，对蓄洪区灾民的疏散过程进行定量分析，开发了蓄洪区灾民步行疏散过程动态模型；北工大交通管理中心以 2008 年北京奥运会为依托，开发了奥运应急疏散管理系统，对奥运开幕式、闭幕式及赛时高峰小时的应急疏散制定预案，为保障奥运会的安全提供了必要应急决策技术支持。尽管国内研究方兴未艾，可是还应当看到，我国对应急行为规则和动态模型的研究开展较晚，尚未形成系统全面的成果，研究的视野不够开阔，研究深度距离世界顶尖水平还有差距。

4. 融合恐慌心理特征的应急疏散动力学的综合研究

应急疏散动力学模型涵盖了环境的复杂因素和

人群的运动特征，已经能够把人类应急恐慌行为的某些定性规则抽取出来，暗示了可能存在统一的深层机制。然而这些模型只能反应应急疏散群体某方面的特性，还不能综合考虑恐慌心理特征，难以提炼人群行为深层次的确切性与随机性规律，因此应用范围依然有限。

考虑到恐慌行为的根本特征，越来越多的研究者意识到，应急状态下的群体行为是由个体层面的复杂行为和个体之间的联系（如：互相激励等）产生的，在设计动态模型时，有必要同时考虑恐慌心理传播和物理接触对逃生人群的每个个体的作用。在心理传播方面，应急恐慌人群的不良心理可以归结为：回避（心理上否认自己处于不利的环境）、固执（固执地执行当前行为，如保护财产）和亲密关系（等待家人或朋友）三种，它们都可能导致逃生几率的降低。人在恐慌中的行为表现大体分为：逃生型、减灾型、验证灾难真实型和通告他人型。从影响疏散的因素重要程度分析，距离安全目的的远近程度和认知水平的高低是惊慌和恐惧心理产生的主要原因。更有趣的是，对疏散时间影响大小依次是：楼层、性别、逃生演练、疏散路线、社会角色、年龄、性格，其中前四个因素起到主导作用。

在动力学行为综合模型中常用的心理作用包括：个体都有与逃生出口位置相关的运动倾向方向和希望的速率；同时，他们又希望与墙等障碍物和其他人保持一个安全的距离。利用这种模型可以观察到，由于短暂的堵塞造成了人群逃生几率降低的恐慌，于是个体加快了运动速度，从而大大加剧了个体之间以及人群与墙体之间的相互挤压和摩擦的力量，引起了在逃生出口圆弧状的堵塞和类似于间歇式雪崩的逃生行为，导致了人群从有序到混乱无序的相变，反而降低了逃生速度。逃生恐慌具有传染性——非理性的群体行为叠加起来，经常是引起过分拥挤行为的主导因素。另一方面，研究发现，恐惧的感觉往往使得人群忽略了一些重要的信息，比如逃生的侧门等等，个体会选择要么跟随邻居运动的平均方向逃生，要么选择一个完全随机的方向逃生，而单凭这两种方式中的一种是不实用的，因为前者仅能凭运气找到出口，而后者则容易收敛到一条死路，但是综合运用这两种策略却可以获取较高的逃生几率。在逃生通道的设计上，人们

通常认为部分加宽逃生通道会降低堵塞的可能性，但是事实恰恰相反，因为在这些被加宽的地方会出现人群的回流，引起堵塞。与之相对应，在出口处附近加一根柱子反而可以加快逃生速度，因为它对人群进行了有效分流。

这些有趣的结论为我们合理设计逃生通道的形状，以获取更好的应急疏散效率，提供了科学依据。另外需要注意的是，以往的研究，所针对的大多是高层建筑或者大型集会场所（例如歌剧院、运动场馆）的灾难疏散，而近年来城市地下交通快速发展，地铁站在上下班高峰尤为拥挤，对于地铁站可能发生的突发事件，如火灾、地震、毒气泄漏、恐怖袭击等，如何开展高效率的人员疏散，国内外都少见研究。

值得指出的是，上述数值模型的仿真结果，尽管可以大体复现紧急逃生群体行为的一些现象，但是由于应急逃生实验很难做，这些群体现象很难被实际验证。因此，一些生物学家转而设计真实的生物学实验，以发现一些更贴近自然的规律。比如，萨洛米（C. Saloma）等在研究鼠群从水坑往旱地上逃生时，发现其出口逃生速度分布与出口宽度满足幂律关系，这个规律可以用来设计适应群体行为的建筑物逃生出口的形状和宽度。此外，他们也进行了一些有关个体行为的更细致的研究，如运动疲劳和个体身体的柔性等对应急疏散行为的影响，并建立了与实际恐慌逃生情况动态相关的关键采样周期的公式。将非常规突发事件的应急疏散研究从数值模型和灾后回访分析上升到了定量实证研究的高度，取得了更具实用性的成果。

5. 采用铲雪堆博弈模型研究恐慌人群逃生行为

行人流是具有强相互作用的多粒子体系。行人流研究对于缓解交通阻塞，尤其是减少突发情况下人员伤亡以及疏导恐慌人群逃生都具有非常重要的现实意义。已有的行人流理论模型主要包括离散模型（元胞自动机模型）和连续模型（流体力学模型、社会力模型）。然而，实地观测的结果表明，行人流系统既不是绝对离散的，也不是完全连续的。行人流内部个体的复杂性，如恐惧、情感、道德等主观因素，以及一

些客观因素，如出口位置、出口个数、障碍物等，使它既有流体的特征，也具备粒子的性质；更有独特的人类心理控制的行为与影响。如何在行人流模拟中反映出个体主观心理控制的复杂性，以及个体之间竞争与合作的复杂相互作用是恐慌行人流研究向我们提出的新挑战。

我们在 *Physical Review E* 87, 022802 (2013) 一文中采用格子气模型并首次引入铲雪博弈研究一个屋子发生火灾后人员如何疏散逃生的问题。我们设定，屋内人员包含两类人：合作者（遵守秩序者）；背叛者（不遵守秩序者）。每个个体只与其邻居有相互作用。本模型中的个体运动规则是：个体作偏随机行走，如图 1 所示。一个个体由格点 x 位置移向邻居格点 y 位置的概率是

$$W(x \rightarrow y) = \frac{1}{1 + \exp[-(P_x - U_y)/\kappa]}, \quad (1)$$

这里 P_x 是处在 x 位置的个体所已经获得的全部报酬收益，相当于个体能量，而 U_y 则是进入 y 位置应该具有的势阱能量。如果 y 位置为房间墙壁，则 U_y 为 1。

这里的个体移动规则意味着：个体能量越大（或者欲占据格点之势阱能量越小），则个体之占据概率就越大。而图 1 显示：一旦某一格点被一新个体占据，则占据此格点的原个体就要被挤到新个体原来所处的格点上。因此，尽管个体是偏随机行走，它仍然具备三种运动状态，向前、静止以及向后。

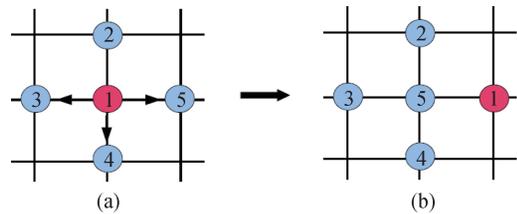


图 1

表 1 出铲雪堆博弈之报酬矩阵

	C	D	E
C	(RR)	(ST)	(1-)
D	(TS)	(PP)	(1-)
E	(-1)	(-1)	(--)

这里 C 表示合作者（遵守秩序，礼让他人者），D 表示背叛者（不遵守秩序，争先恐后者）。两个合

作者相遇, 各得奖赏回报 R , 两个背叛者相遇, 各得惩罚 P ; 而当合作者遇上背叛者, 分别得到回报 S 与 T 。无论是合作者, 还是背叛者, 当他面对一个空格位置 (E), 则其获得回报为 1。(1) 式中的 κ 表示噪声的影响程度。 $\kappa=0$ 表示决定性占据, $\kappa=\infty$ 则表示完全随机占据。

对于铲雪堆博弈, 可设惩罚回报 $P=0$, 背叛者诱惑 $T=b$, 合作者面对背叛者的损失 $S=b-c$, 互相合作奖赏 $R=b-c/2$ 。其中 b 是铲雪堆博弈的理想获利, c 是劳动代价。不失一般性, 可令

$$R=b-c/2=1,$$

并引进单参数

$$r=c/2=c/(2b-c),$$

于是有

$$T=1+r, R=1, S=1-r, P=0,$$

其中 $0 < r < 1$ 。这里引进的损益比参数 r 表示了互相博弈的强烈程度。 $r=0$ 表示房间中的人与未发生火灾情形相同, 彼此并无博弈。而 $r=1$ 则表示房间中人员陷于极端恐慌, 彼此博弈激烈。因此我们引进的损益比参数 r 实际上是发生火灾屋中人员的一种恐慌指数。

表 1 给出的铲雪博弈模型收益矩阵可以反映个体之间复杂的作用力。个体的平均收益 P_x 表征了个体具有的能量, U_y 则是进入 y 位置应该具有的势阱能量。这是 y 位置个体所有邻居给予其收益的累积值, y 位置所处势阱能即为进入 y 位置个体所受到的平均压力。

另外, 我们还引进一个 P_c 参数 ($0 \leq P_c \leq 1$)。它表示每一位博弈者改变当前策略的概率, 反映个体的恐慌心理以及随机应变能力。 $P_c=0$ 表示个体一直保持一个状态 (始终合作或始终背叛), 这种情况可以认为个体比较镇定。 $P_c=1$ 则代表个体交替改变策略, 这种情况可以认为个体心理极端恐慌, 频繁更换其策略, 思绪陷于混乱。

图 2 (a) 给出一个失火房间中当人群中初始合作者比例为 $\rho_{ic}=0.5$, 恐慌心理导致人员改变策略概率 $P_c=0.5$, 在不同损益比参数 r 下, 存留人数的时间演化图。(b) 显示了平均逃逸时间作为损益比参数 r 的

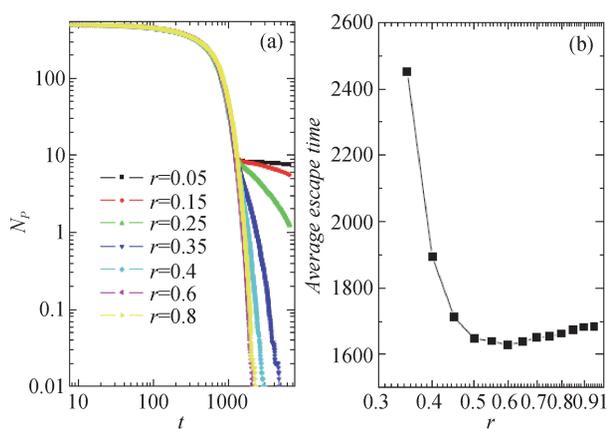


图 2

函数。模拟结果表明: 仅当 r 适中时, 逃生时间最短。这意味着在逃生现场, 人员太放松或太紧张都很危险, 保持一定程度的恐慌才有利于逃生。

图 3 特别显示了对于损益比参数 $r=0.15$ 和 $r=0.9$ 两种极端情况下一个失火房间中 ($\rho_{ic}=0.5, P_c=0.5$) 存留人数的时间演化图。可以清楚看到, 失火房间中的人员过于温良恭谦让而无足够的恐慌心理, 不可能达到人员的全部疏散。

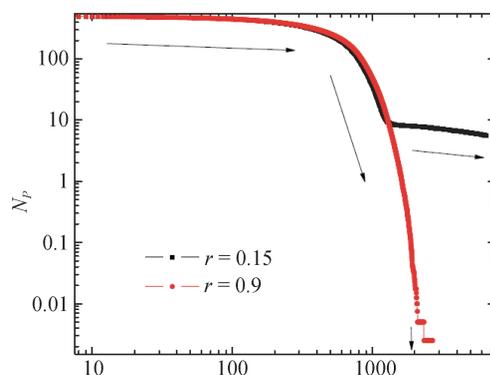


图 3

图 4 显示了对于 $\rho_{ic}=0.1$ 和 $0.9, P_c=0.95$ 和 0.5 四种情况, 火灾屋中总的存留人数 (N_T) 及合作者人数 (N_C) 与背叛者人数 (N_D) 随时间的变化。

图 5 显示了当损益比 $r=0.5$, 初始合作者比例 $\rho_{ic}=0.5$, 火灾屋中人员的平均逃逸时间作为逃生者改变策略概率 P_c 的函数。这一图也清楚显示, 当火灾发生时, 疏散逃逸者过于冷静镇定, 或者过于惊慌失措都是不利于人群整体逃生的。

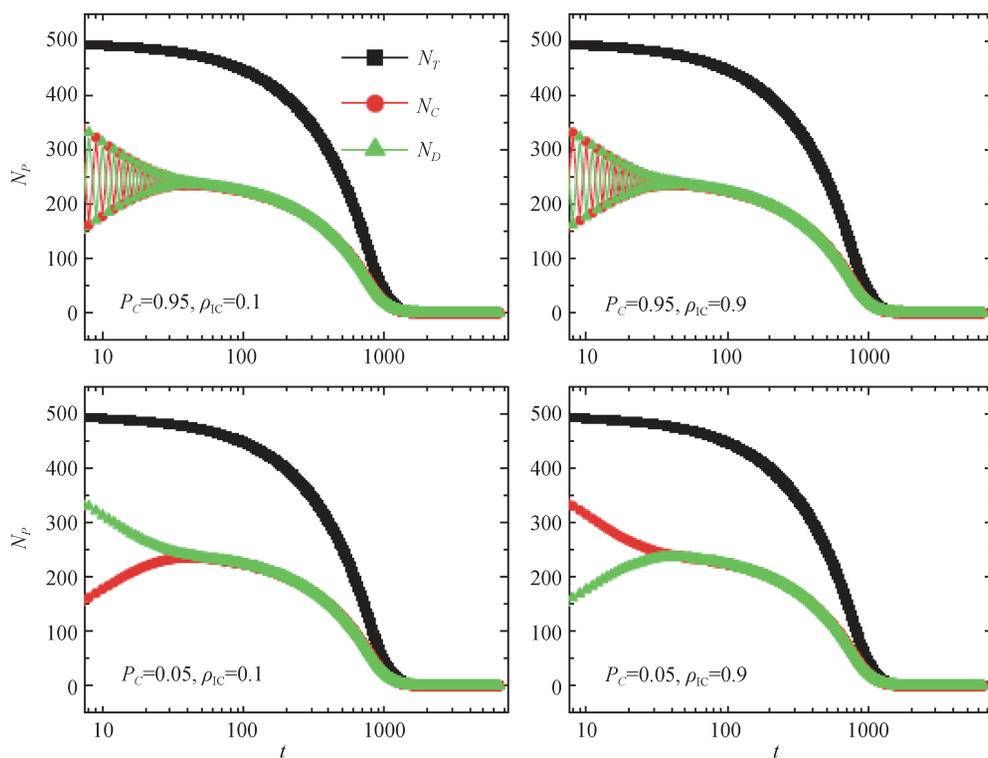


图 4

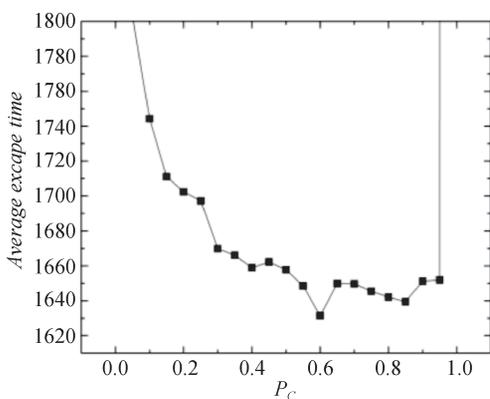


图 5

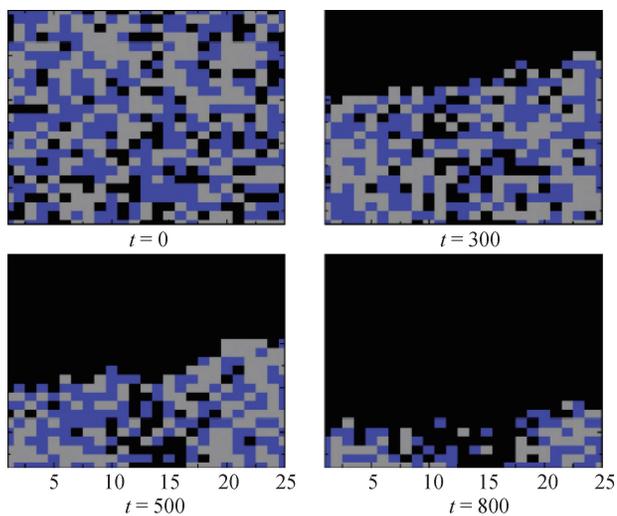


图 6

图 6 显示了一个 25×25 方格所示房间中疏散人群随时间的演化。黑色格子表示空格，蓝色格子表示合作者，黄色格子表示背叛者。