

特殊行为影响下的培智班级教室出口布置疏散优化研究

赵晓晨¹, 马帅康², 于涛³, 贾晓浒⁴

摘要:

智力障碍儿童在紧急情况下属于弱势群体。然而针对智力障碍儿童的疏散研究较为匮乏。另一方面, 教室作为智力障碍儿童在校学习的主要活动场所, 现阶段的大量研究主要根据其空间体验来进行研究, 缺乏疏散角度的空间布局指导。本研究旨在从建筑设计角度提升智力障碍儿童的疏散效率。研究调查了智力障碍儿童在紧急情况下的疏散行为, 基于异质行人流搭建了教室的元胞自动机疏散模型, 在此基础上探讨了教室出入口的最佳配置。研究发现: 当教室小于 50 平方米时, 应设两个疏散门, 两个疏散门更有利于提升疏散效率; 在 16 种教室出口布局中, 出口的最佳位置为 c2 布局。即在教室后端开设两个出口, 其中一个位于后端的边缘, 另一个位于后端的中间位置, 两个出口之间的距离为 2.4m。研究结果有望为未来针对智力障碍儿童的教育建筑设计、建筑规范的制定提供参考。

关键词: 元胞自动机模型; 异质行人流; 培智类学校; 教室疏散优化; 仿真模拟

Keywords: Cellular automaton; Heterogeneous pedestrian flow; Special education school; Classroom evacuation optimisation; Simulation

资助项目情况: 国家自然科学基金面上项目 (52078255); 内蒙古自治区自然科学基金面上项目 (2020MS05007); 内蒙古自治区直属高校基本科研业务费项目 (ZTY2024043)

引言

在一般情况下, “智力障碍” (ID) 是指人员智力功能和适应性行为两方面均存在显著性限制的障碍[1]。在美国《诊断和统计手册》中, 智力障碍依据智力商数 (IQ) 和适应性行为分为轻度障碍 (IQ=50/55-70)、中度障碍 (IQ=35/40-50/55)、重度障碍 (IQ=20/25-35/40) 和极重度障碍 (IQ<20/25) [2]。在紧急情况下, 智力障碍人群可能比正常人群更加脆弱。美国消防局的统计数据表明, 约 1700 起住宅火灾中都与患有精神健康或智力障碍的人士有关[3, 4]。他们与健康人群相比在信息处理和决策方面更为困难, 从而导致他们在建筑物内部的疏散过程更为复杂[3]。然而尽管这类人群在疏散中面临更大风险和挑战, 研究者对于智力障碍人群的疏散研究目前来说仍相对匮乏[3]。因此如何提升这类人群的疏散效率, 从而减少紧急情况下的人员伤亡, 是一个亟待解决的科学问题。

¹ 赵晓晨, 内蒙古工业大学建筑学院, 硕士研究生

² 马帅康, 内蒙古工业大学建筑学院, 硕士研究生

³ 于涛, 内蒙古工业大学建筑学院, 硕士研究生

⁴ 贾晓浒 (✉), 内蒙古工业大学建筑学院, 教授, gdjiaxiaohu@126.com

大量研究表明,对人员疏散安全的预防性考量,可以有效防止紧急情况下威胁公共安全的二次伤害的发生[5-7]。对于建筑的预防性的疏散研究大致可以被分为两种情况:第一种为通过疏散人员行为或运动规律研究来提出疏散策略,从策略角度提升人员的疏散效率[8-10]。Lu等学者探讨了高层建筑火灾疏散中使用电梯疏散的可行性,论证了改进的疏散策略对于缩短疏散时间的巨大优势[9]。Wang等学者探讨了救援人员的引导策略在行人疏散中的重要性[10]。还有一些学者通过研究疏散人员的特征如对环境的熟悉度[11]、恐慌程度[12]、路线选择[13]、人群的行为方式[14]等因素,从而针对性的提出疏散策略。另一种则是通过改善建筑物理环境,使其有利于人员疏散,从而从设计角度提升人员疏散效率[15, 16]。Zhou等学者探讨了建筑结构对疏散的影响[16]。Xiong等学者探讨了在剧院中设置紧急疏散楼梯与旋转礼堂对疏散效率的影响[17]。还有学者研究了小学交通空间(楼梯+走廊)最优设计组合[18]。尽管疏散策略的提出对提升人员疏散效率有着巨大的贡献,然而在紧急情况下,由于事发突然且可能需要额外的人力物力支持,且智力障碍人群本身存在感知障碍、认知障碍等障碍[19],因此针对这类人群提出改进的疏散策略可能无法及时落实,从建筑设计角度出发改善建筑的物理环境将更有助于这类人群的疏散效率的提升。

在教育类建筑的疏散研究中,教室的疏散问题占有重要地位,一方面由于教室人口密度相对较高且存在许多障碍物,在紧急情况下可能会造成不可预见的人员和财产损失[20]。另一方面因为学生具有一些特殊特征,而这些特征的存在使得他们在疏散时更易受到伤害[21]。对于健康学生而言,其本身认知、生理、以及社会层面的感知同成年人存在较大差异,导致其自我控制以及决策能力较为弱势[22]。智力障碍学生相较于健康学生,其基本运动技能、位移技能、控制技能落后[23]。在疏散中存在风险认知不足、反应迟钝、运动缓慢的特点[24]。考虑到学生的逃生能力有限,而教室是学校内人口最稠密的地方,这使得疏散过程更加复杂[25]。因此无论对于健康学生还是智力障碍学生而言,都应将教室疏散作为研究重点。

在教室疏散研究中,研究热点主要围绕“疏散模拟”展开[26]。研究者通常通过对学生进行疏散实验,在前者的基础上构建疏散模型,从而为接下来的仿真模拟提供基础[27-30]。这些研究中,相关研究者调查了学生的匹配行为[27]、疏散准备时间、特殊疏散场景下疏散行为[28, 29]、出口选择[30]等方面的内容,从而有针对性的构建疏散模型。这些疏散模型包括晶格气体模型[31, 32]、Agent-based (AB)模型[25, 33]、元胞自动机(CA)模型[27, 34]、社会力模型[30]等。其中CA模型由于其简单、灵活、高效的特点,更适合描述复杂情况下的行人动态被大量学者所采用[35]。相关研究表明,教室出口位置会对学生的疏散时间造成影响[35, 36]。Zhu等学者对使用元胞自动机模型对小学教室出口的位置进行了研究,发现设置正对过道的教室侧面出口有利于学生疏散[36]。Alizadeh等学者基于CA模型讨论了行人分布、门位置和门宽对疏散时间的影响[35]。

对于智力障碍学生教室的疏散研究相对较少,一项针对一所残疾儿童中学的疏散情况的研究包含了智力障碍儿童,学者通过观察学校的疏散演习情况,在数据的基础上开发了整个学校疏散模型[37]。尽管该模型在填补相关领域的空白做出了卓越贡献,但该模型并非特定的针对智力障碍学生进行研究,所开发的模型也较为宏观,没有赋予智力障碍学生更多的行为特征。另一项研究对中国台北特殊教育学校的疏散情况进行了调查,从而提出不同残疾程度学生在疏散支持方面的挑战和要求,以及在疏散中的应对策略。研究建议需要对不同残疾程度的学生建立针对性的疏

散培训[38]。研究中包含了残疾人群教室设施以及疏散流线的相关研究内容，但其针对人群为残疾学生（智力障碍、听力障碍、视力障碍等），也同样缺乏智力障碍学生针对性的疏散研究。一些研究针对智力障碍学生生理、心理、教育理念出发从而对其教室的设计提出见解[39, 40]，但缺乏从疏散角度开展调查的相关研究。对于智力障碍学生而言，他们的疏散行为与健康学生相比是否存在不同，教室出口位置是否和正常人群类似，还有待进一步的论证。

在此背景下，本研究旨在探索智力障碍学生在紧急情况下的疏散行为，探讨在学生疏散行为影响下，教室出口数量、出口位置是否对群体疏散时间产生影响。为了探讨该问题，本研究首先对中国北方一所特殊教育学校中的智力障碍儿童进行了疏散实验，并基于疏散实验构建了元胞自动机疏散模型。之后依据中国的现行设计规范与现实情况针对不同出口位置，考虑了16种教室出口布置形式。最后基于构建的疏散模型进行仿真模拟，并对培智类学校教室的疏散门布置提出疏散优化建议。

1 智力障碍儿童疏散行为调查

1.1 疏散实验

由于针对智力障碍儿童的疏散研究是有限的，为了探索智力障碍儿童在教室中的疏散行为，我们对一所特殊教育学校中的智力障碍儿童的疏散过程进行了观察，并对教师与智障儿童在疏散中的行为进行了详细的分析，以确定他们之间是否进行了互动，以及互动的程度。共有49名智力障碍儿童参加了本次疏散演练。

Najmanová等人在年龄较小的儿童中观察到学生的依赖行为[41]。具体表现为：反应缓慢、无视所提供的指示、需要重复建议或额外的身体帮助。Chen等学者建议根据残疾学生（包括智力残疾学生）的认知能力、身体技能以及与其他人员（包括教师）的辅助程度，将疏散中的人员的残疾严重程度划分为四个等级[38]。在本研究中，鉴于智力障碍儿童通常没有明显的身体技能障碍，我们根据学生对教师的依赖程度将智力障碍儿童与教师的互动行为划分为三类：(a)不依赖：学生在教师发布疏散指令后（例如：快跑，快跑）能够快速响应，独立完成疏散，甚至在疏散过程中协助其他同学完成疏散。(b)轻度依赖：学生对教师形成一定程度的依赖，响应较慢，需要在教师的不断提醒下才能开始疏散。教师的辅助仅限于口头上的提醒。(c)重度依赖：学生需要直接得到老师或同学的行为辅助。例如，教师或其他学生可能会跑到学生身边拍一拍，提醒其疏散；或者被教师拉着一同疏散。如果满足(b)或(c)，则可以认定为教师与学生之间发生了一定程度的互动。依赖程度示意图如（图1）所示。

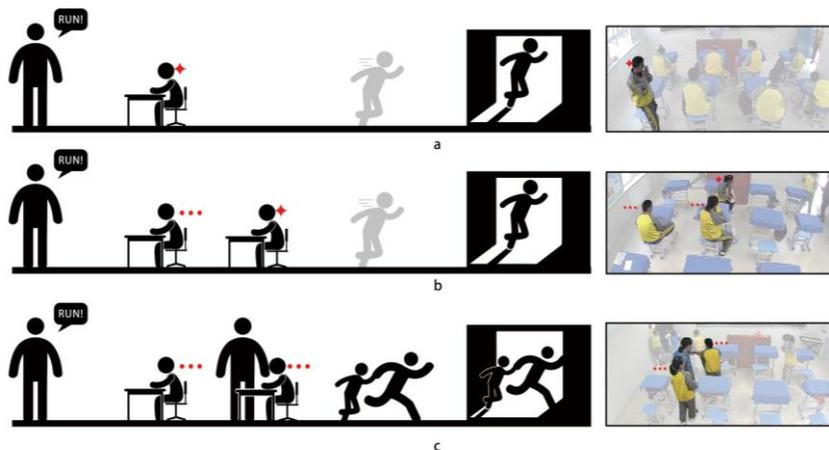


图1 学生依赖行为示意图 (a)对教师不形成依赖的智障学生行为示意. (b)对教师形成轻度依赖的智障学生行为示意. (c)对教师形成严重依赖的智障学生行为示意. (图片来源:作者自绘)

通过对视频的仔细分析,我们发现在教室内,学生的依赖行为呈现出显著的梯度,三种依赖程度的行为都在观察范围内。此外,我们还调查了这三类人群的识别时间(指从警示铃声响起到儿童做出疏散决定之间的时间。在这一阶段,儿童开始处理信息,例如观察周围老师和同学的反应等,然后主动或被动地做出是否采取疏散行动的决定。本研究中,识别时间的计算从警示铃声响起到儿童开始离开座位或采取行动为止。)在两次疏散中,有42.2%的智力障碍儿童能够在不依赖老师的指导下进行自主疏散,他们的平均识别时间为5.36秒。21.3%的智力障碍儿童需要在教师的重复建议下才开始疏散,属于轻度依赖,他们的平均识别时间为8.05秒。另外,34.4%的学生需要老师提供额外的身体帮助,例如被触碰提醒、帮助寻找毛巾或者由教师拉着一同疏散,属于重度依赖,他们的平均识别时间为10.33秒。相似的依赖行为在Najmanová等人的研究中也被发现[41]。在他们的研究中,观察到10%的学龄前健康儿童表现出反应缓慢、无视所提供的指示、需要重复建议或额外的身体帮助。这些行为主要出现在年龄较小的儿童中,且在整个研究样本中所占比例相对较小。相比之下,智力障碍儿童群体中表现出这几种依赖行为的比例较大。

1.2 疏散演练调查

在中国,消防安全教育不仅对正常儿童至关重要,对包括智力障碍儿童在内的残障人士同样至关重要。根据教育部规定,包含特殊教育学校在内的中小学需要定期开展消防疏散演练,以提高学生在面临紧急情况时的疏散效率[42]。因此,为了扩大样本量,我们向73位有带班经验的培智班级班主任,在充分了解智力障碍儿童三类疏散行为的基础上发放了问卷,以在更广泛的范围内调查上述三类疏散行为是否存在,从而为构建教室疏散模型提供依据。

我们调查了在疏散过程中智力障碍儿童是否存在1.1章节中所述的三种异质行人流。结果表明,在疏散实验中观察到的三种异质行人流客观存在且并非特例,所有的教师根据其以往疏散过程中的观察,在这一选项上(是否存在三类异质行人流)均表示赞同。其次,我们调查了培智班级的班级容量。根据《JGJ76-2019特殊教育学校建筑设计标准》,培智学校班容量宜为8人每班。但根据调查而言,实际情况下班级容量范围在6-18人,这可能跟当地教育资源配置情况有关。其中班级容量为12人/班的情况最多,占到调查人数的45.21%。

2 元胞自动机疏散模型构建

2.1 疏散场景

考虑到真实场景和研究目标，本文采用了 CA 模型。CA 模型被广泛用于探索各种场景下的疏散，对于 CA 模型，需要将空间离散化。我们定义每个元胞的大小为 $0.4\text{m} \times 0.4\text{m}$ ，每个元胞的状态为空置或被行人占据。疏散场景由不可穿行的墙、障碍物（书桌、讲桌）、用于行人通行的门、走廊构成。行人由教师与三类智力障碍儿童组成。基于上述基本设定，我们给与本研究中疏散场景以下设定，疏散场景以及开门位置如（图 2）所示：

1. 教室人数根据 1.2 章节中对班级容量调查的结果确定，选择情况最多的 12 人/班这一配置进行设定。

2. 教室布局采用传统的教室布局，两张桌子拼合在一起。根据《JGJ76-2019 特殊教育学校建筑设计标准》对课桌尺寸的规定，其平面尺寸不宜小于 $0.6\text{m} \times 0.4\text{m}$ 。因此在本研究中将单张课桌的尺寸定义为 $0.6\text{m} \times 0.4\text{m}$ ，两张桌椅横向排布，尺寸为 $1.2\text{m} \times 0.4\text{m}$ （即 3×1 个元胞）。

3. 根据《JGJ76-2019 特殊教育学校建筑设计标准》对课桌间排距、纵向走道的规定，我们将课桌间的排布距离设为 1.2m （即 3 个元胞宽度）。

4. 讲台设定在教室前方，尺寸为 $1.2\text{m} \times 0.4\text{m}$ （即 3×1 个元胞），距离黑板 0.8m （宽度两个元胞），所有的教学工具均放置在讲台上。

5. 根据《JGJ76-2019 特殊教育学校建筑设计标准》对教室最前排课桌前缘至黑板的水平距离、教室最后一排课桌后缘与后墙的距离的要求，因此我们将课桌前缘距黑板的距离设定为 2.8m （7 个元胞的宽度），将课桌后缘距后墙的距离设定为 1.6m （4 个元胞宽度）。

6. 根据《JGJ76-2019 特殊教育学校建筑设计标准》对教室门的尺寸规定，教室门的净宽不应低于 0.9m （规范是不是不应低于），因此本研究将疏散门的宽度控制在 1.2m 。疏散门朝向疏散通道，无遮挡。

由于在进行教室设计时，通常将教室串联布置，极少存在双边开门的情况，因此本研究中将教室出入口设置为单边开门。单边开门情况经排列组合得到 16 种开门方式。其中开设一个出入口的情况（教室面积小于 50m^2 ）为 7 种，开设两个出入口的情形为 9 种。

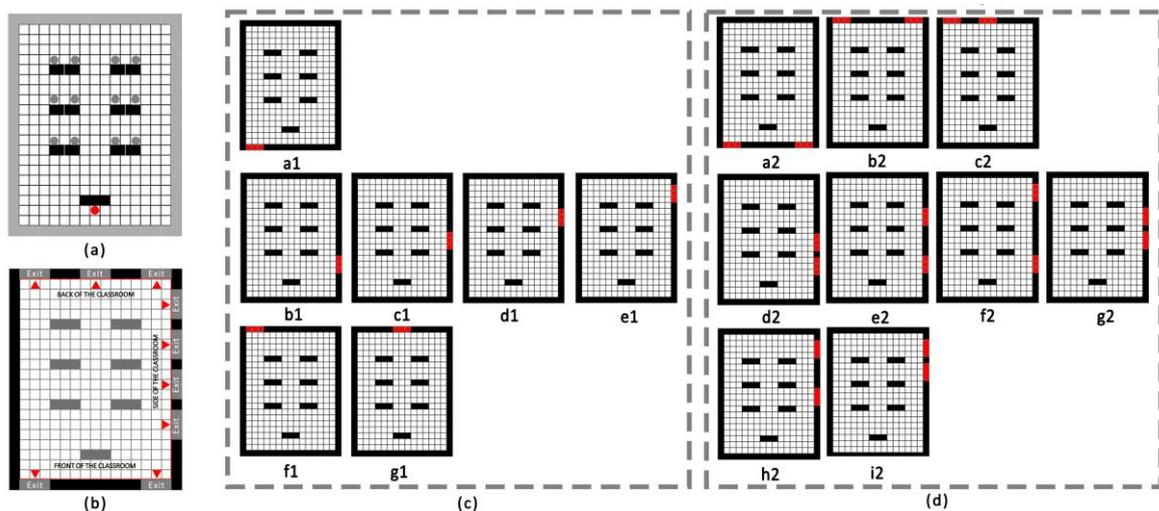


图 2 (a) 教室内部障碍物布局示意图。(b) 教室出口位置示意图。(c) 在教室一端开设一个出口的 7 种情况示意图。(d) 在教室一端开设两个出口的 9 种情况示意图。（图片来源：作者自绘）

2.2 静态场赋值

在确定了疏散场景的形状、布局、障碍物的位置之后，需要为每个元胞赋予一个常量值，表示元胞到出口的距离，较低的赋值靠近出入口，行人在静态场中从赋值高的元胞运动到赋值低的元胞。在本研究中，我们对静态场的赋值是基于每个元胞到出口最短距离而获得的。本研究采用的赋值方法，不仅可很好地计算行人距离出口的距离，同时有着算法结构清晰、规则简单、运算速度快、计算量小的优点[43]，赋值规则如下：

1. 在以确定的疏散场景的基础上，将出入口被赋值为 0，墙壁、障碍物等不可行走位置处赋予远大于可行走区域的赋值，本研究取 500；
2. 各出口作为起始位置由外向内逐层进行赋值。如果某元胞已经得到赋值 N ，则相邻垂直或平行的元胞为 $N+1$ ，相邻对角线取 $N+1.41$ ；
3. 由于某些场景有多个出口，会出现元胞赋值产生冲突，若存在元胞赋值冲突的情况，那么则取所有可能赋值情况中的最小赋值；
4. 第二层赋值完成计算第三层元胞赋值；
5. 重复上述过程直至对疏散场景中所有的元胞完成赋值，则算法结束。

(图 3) 展示了元胞的运动原理，以及将上述规则应用于疏散场景的静态场。

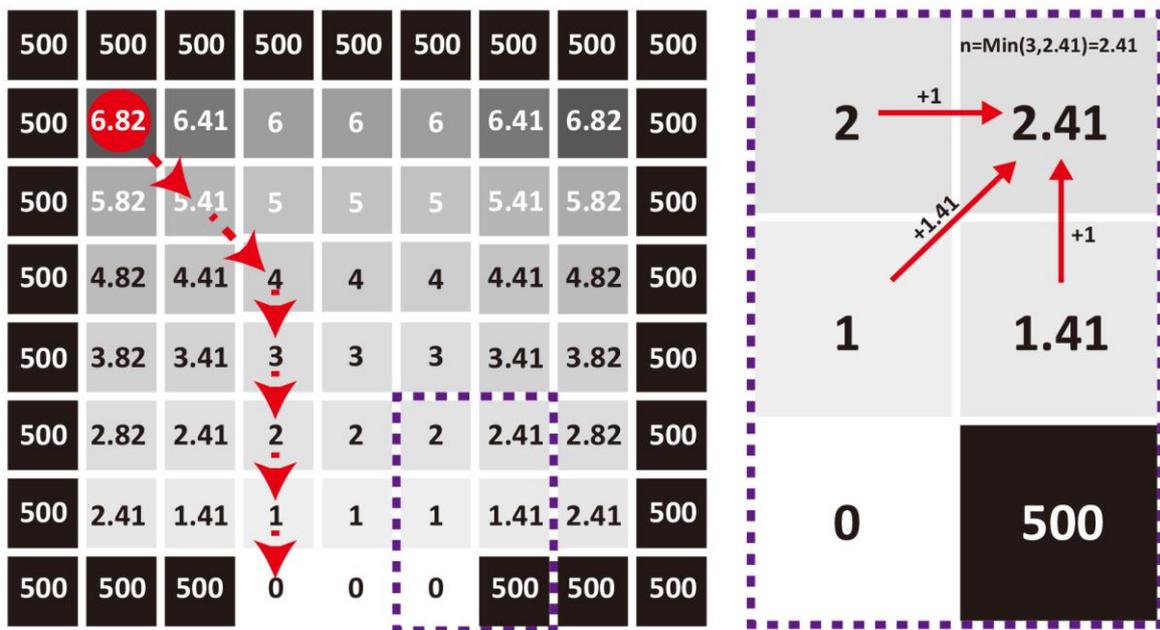


图 3 元胞自动机模型静态场赋值示意图。(图片来源：作者自绘)

2.3 行人疏散运动规律

元胞自动机被广泛的用于疏散模拟，除了对疏散场景的构建外，还需要对其中的行人运动规律进行设定[44]。我们根据对疏散演练的观察，确定了三类异质人流的存在（即对教师不依赖、轻度依赖、重度依赖三类人群）。为了简化疏散模型，在本研究中我们将这三类人群在班级中的占比都设定为 1/3，即无依赖行为学生人数：有轻度依赖行为学生人数：有重度依赖行为学生人数=1: 1: 1

2.3.1 基本规则设定

通过对培智班级的疏散过程的观察，可以得出三类智力障碍儿童在紧急状况下的行为模式。对教师不产生依赖的学生，可以在得到老师指令的第一时间朝着离自己最近的疏散门开始疏散；对教师具有一定依赖程度的学生需要老师不断进行语言提醒，在经历过一段时间的反应时间后朝着最近的疏散门疏散；对教师依赖程度较大的智力障碍儿童，需要老师在语言提醒的基础上，进行一定程度的肢体接触才能完成疏散，这意味着他们需要老师来到他们座位旁边协助其完成疏散，且老师需要同时带多个学生；老师将学生带到教室门口处，等待所有学生离开教室后，最后一个完成疏散。具体规则设置如下。

(1) 疏散时，为了模拟真实情况，将三类智力障碍儿童的初始位置设置为随机。因为在通常情况下，培智类学校班级中排座位时，通常不根据疏散时学生对教师的依赖程度进行，具有一定的随机性；

(2) 通常情况下，在培智类学校的班级中，教师的数量为 1-2 人，在本研究中，我们将教师人数设定为一人，以模拟最坏的情况。

(3) 行人在进行疏散的过程中，通常会因为拥挤等情况导致无法观察到出入口，从而在出入口的选择上存在个体差异。在本研究中，由于教室内人数较少、空间尺度较小、智力障碍儿童可以对出入口形成较为清晰的观察。因此，当面对两个出入口的选择问题时，本研究采用就近原则，学生将朝着据离自己最近的出入口疏散。

(4) 对教师不产生依赖的学生，在开始疏散后在座位上停留 5.36s 后立刻产生行动，朝着最近的疏散口撤离。数值取值来自对三类智力障碍儿童识别时间的测定。

(5) 对教师产生轻度依赖的学生在开始疏散后，在座位上停留 8.05s 后立刻产生行动。数值取值来自对三类智力障碍儿童识别时间的测定。

(6) 对教师产生严重依赖的学生，在开始疏散后停留在原位置，直到教师来到其附近位置，之后随教师一同疏散。

(7) 默认教师对班级内学生疏散情况较为了解，知晓班级中对教师依赖程度较为严重的智力障碍儿童所处位置。教师在疏散开始后立即行动，朝着距离教室出入口最远的智力障碍儿童（严重依赖）运动，之后逐一到达剩余智力障碍儿童附近，完成寻找任务后，选择最近的出入口，随 4 位对教师依赖严重的智力障碍儿童一起疏散。

(8) 教师到达疏散门附近后停留在原地，等待智力障碍儿童全部离开教室后，最后完成疏散。

(9) 根据对智力障碍儿童的疏散演练观察结果，观察到智力障碍儿童在无障碍物平面上的旅行速度为 0.42m/s-2.46m/s，平均值为 1.36m/s。教师的平均速度设定为 1.4m/s。为了简化疏散模型，智力障碍儿童与教师的移动速度均设定为 1.4m/s。

2.3.2 转移概率设定

转移概率函数是元胞自动机模型中的一个重要组成部分，被用于实现行人在元胞上的运动。根据以上规则，行人的转移概率可以被分为两种，第一种是行人自主转移到教室出口处的概率函数，表达式见式 (1) - (4)

$$P_{ij} = N \cdot \exp(k_s \cdot S_{Eij}) \cdot (1 - n_{ij}) \cdot \varepsilon_{ij} \quad (1)$$

$$S_{ij} = \max\{r_{Eij}\} - r_{Eij} \quad (2)$$

$$n_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{元胞空闲} \\ 1, & \text{元胞被行人占据} \end{cases} \quad (3)$$

$$\varepsilon_{ij} = \begin{cases} 0, \text{墙或其他障碍物} \\ 1, \text{无障碍物} \end{cases} \quad (4)$$

式中： P_{ij} 为行人选择相邻元胞（ i, j ）的概率（行人附近有 8 个目标元胞，包括上下左右四个方向以及左上、左下、右上、右下 8 个方向的目标元胞）。式中 N 为归一化系数。 k_s 为静态场参数。 S_{Eij} 表示元胞（ i, j ）的静态层次域，依赖于元胞（ i, j ）距离出口的距离。 r_{Eij} 为元胞（ i, j ）距离出口的最短距离。 n_{ij} 和 ε_{ij} 为元胞（ i, j ）状态参数。其中 n_{ij} 为元胞被行人占据状态，当元胞被行人占据时 $n_{ij} = 1$ ，当元胞空闲时则 $n_{ij} = 0$ 。 ε_{ij} 被用来判断元胞（ i, j ）是否为障碍物，若元胞为障碍物（墙或桌椅）则 $\varepsilon_{ij} = 0$ ，若元胞非障碍物，则 $\varepsilon_{ij} = 1$ 。

第二种是教师寻找任务（自疏散开始，教师开始寻找对其产生严重依赖的学生）的转移概率，教师到目标学生位置处 O_k 的概率函数，由于有多个目标点的存在，因此 $k = 1, 2, 3, 4$ 。表达式见式（5）-（6）

$$P_{ij} = N \cdot \exp(k_s \cdot S_{Okij}) \cdot (1 - n_{ij}) \cdot \varepsilon_{ij} \quad (5)$$

$$S_{Okij} = \max\{r_{Oij}\} - r_{Oij} \quad (6)$$

式中 P_{ij} 为教师选择的相邻元胞（ i, j ）的概率。 S_{Okij} 的表示教师附近元胞（ i, j ）的静态层次域，依赖于元胞（ i, j ）到目标学生位置点 $O_k(k=1,2,3,4)$ 的距离； r_{Oij} 表示元胞（ i, j ）距离目标学生的最短距离。

在模型演化过程中，由于存在多个行人同时竞争一个空闲位置的情况，因此行人之间会存在位置冲突。当行人之间存在位置冲突时，系统将会以相等概率随机选择一个行人占据该位置，被选择的行人将在下一步内移动到目标位置，没有被选中的行人将留在原地保持位置不变。

3 模拟结果与分析

详细的元胞自动机疏散模型的构建方法已在第 2 章节中详细说明，本节呈现了不同出口布局影响下的数据收集的结果。在设定的基础上，我们对 16 种教室出口布局进行了模拟。其中在教室的前端、侧端、后端开设一个出口的情况为 7 种，在教室的前端、侧端、后端开设两个出口的情况为 9 种。值得注意的是，由于疏散模型中存在一定的随机参数，特别是三类智力障碍儿童的初始位置为随机设定的，因此,为保证分析结果的准确性，我们对每种布局分别模拟了 1000 次，模拟过程如（图 4）所示。数据统计详见（表 1）与（图 5）。

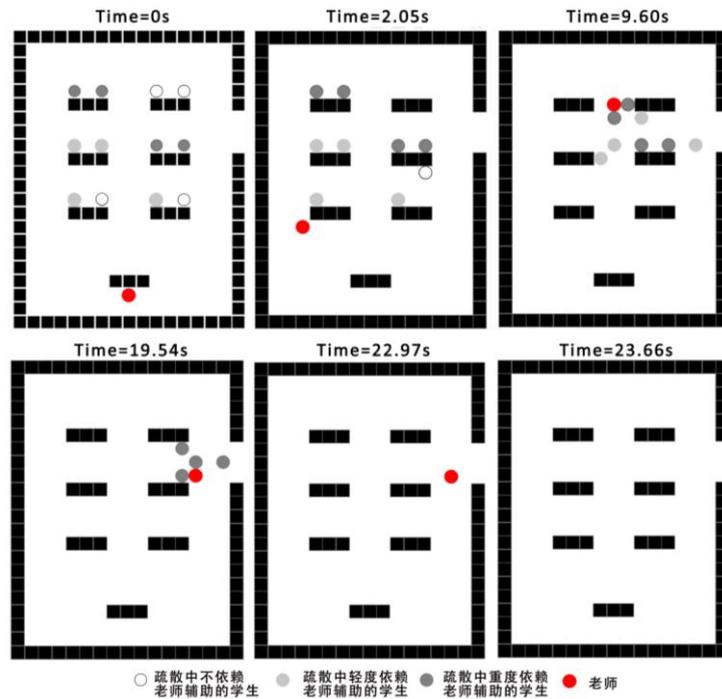


图4. 元胞自动机模型运行过程示意图. (图片来源: 作者自绘)

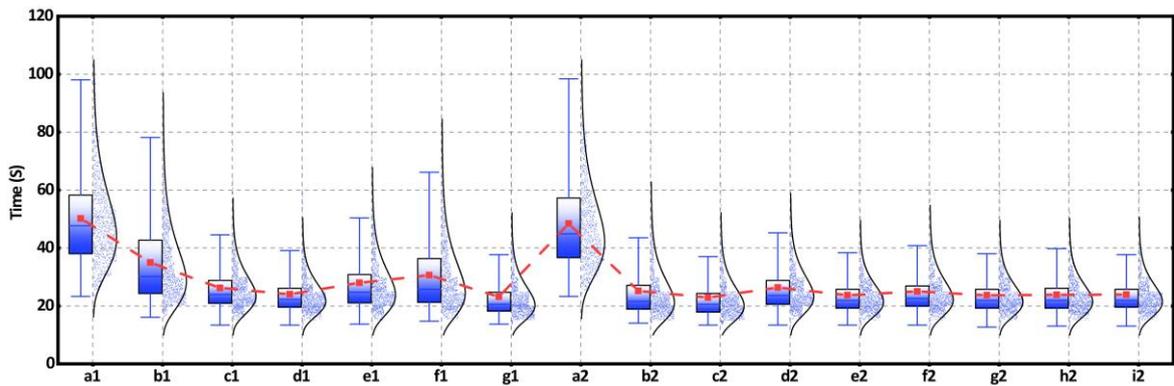


图5 疏散时间统计箱型图. (图片来源: 作者自绘)

表1 不同出口布局下的教室疏散时间统计 (表格来源: 作者自绘)

教室 编号		百分位数								
		平均值(s)	中位数(s)	众数(s)	标准偏差	最小值(s)	最大值(s)	25%(s)	50%(s)	75%(s)
一个 出口	a1	50.17	47.66	37.71	15.87139	23.31	99.77	38.06	47.66	58.29
	b1	34.95	30.17	22.97	14.34185	16.11	99.43	24.34	30.17	42.77
	c1	26.24	24.00	22.29	8.65441	13.37	91.89	20.91	24.00	28.80
	d1	24.05	22.29	20.57	7.59639	13.37	84.69	19.54	22.29	26.06
	e1	27.96	24.69	22.97	10.80363	13.71	99.43	21.00	24.69	30.86
	f1	30.66	25.71	19.89	13.77554	14.74	98.40	21.26	25.71	36.34
	g1	23.19	20.57	20.23	8.74567	13.71	98.40	18.17	20.57	24.69
两个 出口	a2	48.41	44.91	36.00	15.41520	23.31	98.74	36.69	44.91	57.26
	b2	25.21	21.60	19.89	10.71813	14.06	90.17	18.86	21.60	27.09
	c2	22.88	20.57	21.60	8.51517	13.37	87.09	17.83	20.57	24.34
	d2	26.37	23.66	22.97	9.23993	13.37	98.74	20.57	23.66	28.80
	e2	23.71	21.94	19.89	7.61099	13.37	92.57	19.20	21.94	25.71
	f2	25.00	22.63	19.20	8.96917	13.37	95.66	19.89	22.63	27.00
	g2	23.71	21.94	20.57	7.29187	12.69	72.69	19.20	21.94	25.71

h2	23.83	21.94	20.23	7.75870	13.03	95.66	19.20	21.94	26.06
i2	23.91	21.94	19.89	7.68898	13.03	87.77	19.5400	21.9400	25.7100

表1的数据统计显示,16种教室布局的疏散时间范围在12.69s-99.77s之间。就疏散时间平均值而言,根据图6可以看出a1、a2两种出口布局在疏散时间平均值层面同其他布局存在较大差异。在开设一个出口的情况下,g1出口布局的平均疏散时间最短,为23.19s;a1出口布局疏散时间最长,为50.17s。在开设两个出口的情况下,c2出口布局的平均疏散时间最短,为22.88s;a2布局的平均疏散时间最长,为48.41s。

3.1 出口数量对疏散时间的影响

智力障碍儿童的教学空间,由于其容纳人数较少,因此教室面积通常较小(<50m²)。因此,我们必须首先面对的问题之一是设置几个出口。我们对开设一个出口和两个出口的教室模拟情况进行了差异性(T-test)检测。结果显示在(表2)和(图6)中。研究表明,开设两个出口与开设一个出口相比,差异性显著(p<0.05)。开设两个出口的教室更有利于智力障碍儿童的疏散,其平均疏散时间减少了12.99%。基于以上分析,我们认为对于智力障碍儿童的教室设计而言,在其教室内开设两个出口更有利于智力障碍儿童疏散。

表2 不同出口数量影响下的疏散时间数据差异性检测(表格来源:作者自绘)

	开门数量	样本数量(n)	均值(s)	标准差	标准误差平均值	p-value
疏散时间	1	7000	31.0303	14.62261	0.17477	<0.001*
	2	9000	27.0026	12.22342	0.12885	

P-value<0.05*,差异性统计显著

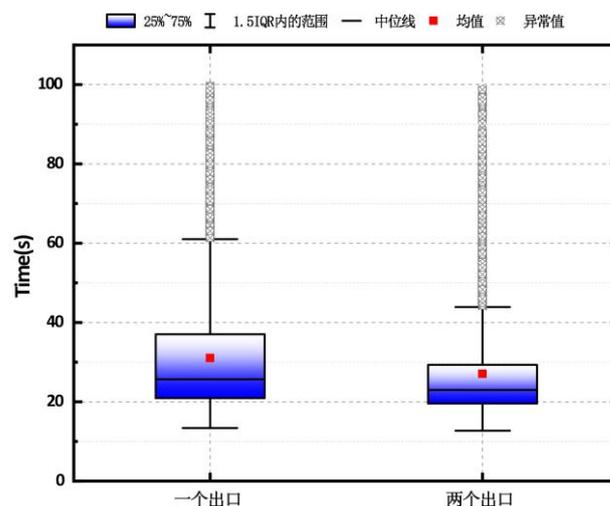


图6 不同出口数量影响下疏散时间统计箱型图。(图片来源:作者自绘)

3.2 出口开设位置对疏散时间的影响

在进行建筑设计时,选择出口的位置是建筑师需要考虑的另一个问题。开门的位置可以分为四种情况。(1)在教室黑板两侧开设出口,即教室前端;(2)在与黑板垂直方向的教室侧面开设出口,即教室侧端;(3)在与黑板相对方向的教室后墙上开设出口,即教室后端;(4)在教室任意两端(前

端、侧端、后端)开设出口。由于考虑到培智类学校教室的特殊性,例如需要在教室中增加辅助用房(陪护空间、卫生间等),因此其教学区域出口位置通常被布置在教室的一端。

在本研究中,我们对教室一端开门的三种情况进行了讨论,使用差异性检测(H-test)分析了在三种情况下的疏散时间的差异性。差异性检测结果如(表3)所示,数据统计见(图7)。结果表明:在开设一个出口的前提下,三种位置下的疏散时间数据分布呈现显著差异($p < 0.05$)。通过比较其秩平均值,发现在教室后端位置开设出口,整体疏散时间最短,平均疏散时间相较于教室前端减少了46.32%,相较于教室侧端减少了4.88%。在开设两个出口的前提下,三种位置下的疏散时间数据分布同样表现出较强的差异性($p < 0.05$)。在教室后端位置开设出口,整体疏散时间最短,平均疏散时间相较于教室前端减少了50.32%,相较于教室侧端则相差不多。

表3 不同出口位置影响下的疏散时间数据差异性检测(表格来源:作者自绘)

	单门位置	N	秩平均值	平均值(s)	P-value
一个出口	教室前端	1000	5903.23	50.17s	<0.001*
	教室侧端	4000	3249.95	28.30s	
	教室后端	2000	2800.24	26.92s	
两个出口	教室前端	1000	8076.97	48.41s	<0.001*
	教室侧端	6000	4173.71	24.42s	
	教室后端	2000	3692.64	24.05	

P-value<0.05*, 差异性统计显著

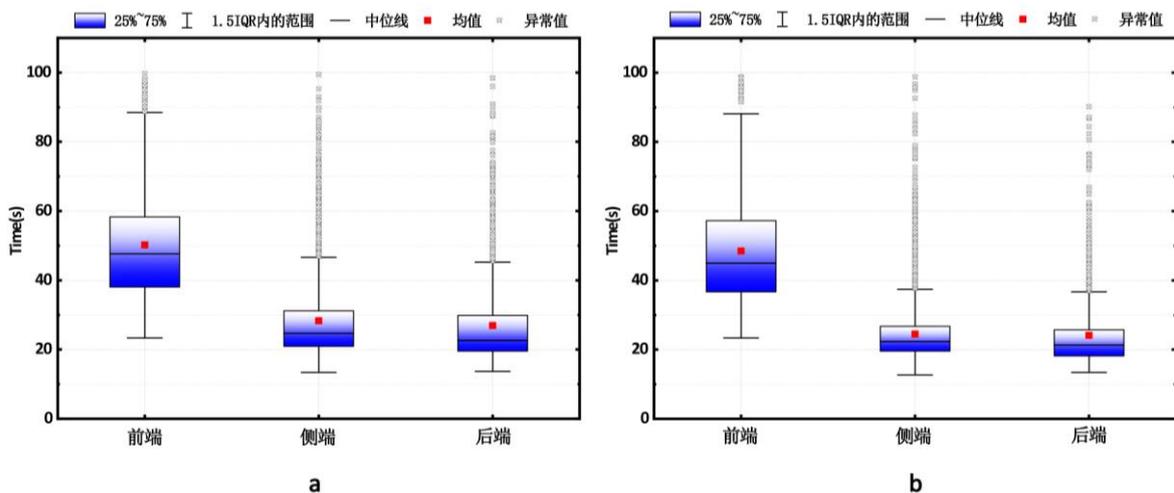


图7 不同出口位置影响下疏散时间统计箱型图。(图片来源:作者自绘)

3.3 两个出口相距距离对疏散时间的影响

在教室侧端和后端设置两个出口时,其平均疏散时间相差时间较小。为了评估两个出口之间相距距离对疏散时间的影响,我们分别给出了描述疏散时间与出口之间距离关系的拟合曲线,结果如(图8)所示,各项参数数值在(表4)中呈现。需要注意的是,由于教室前端通常存在黑板,讨论教室前端两个出口之间的距离是受限的。因此,本节重点讨论在教室侧端和后端开设两个出口的情况下,出口之间距离对疏散时间的影响。如(图8)所示,出口距离与平均疏散时间之间的关系满足方程(7)。其中B1、B2代表着自变量x的一次项系数和二次项系数。Intercept是当自变量为0时T

的起始估计值。

$$T = intercept + B1 \cdot x + B2 \cdot x^2 \quad (7)$$

三个拟合曲线表明，平均疏散时间随着距离的增大而呈现先减小后增大的趋势。综上所述，我们认为对于智力障碍儿童而言在培智教室边缘开设两个出口，出口之间距离并不是越远越好，当距离在 2m-4m 之间平均疏散时间最短。

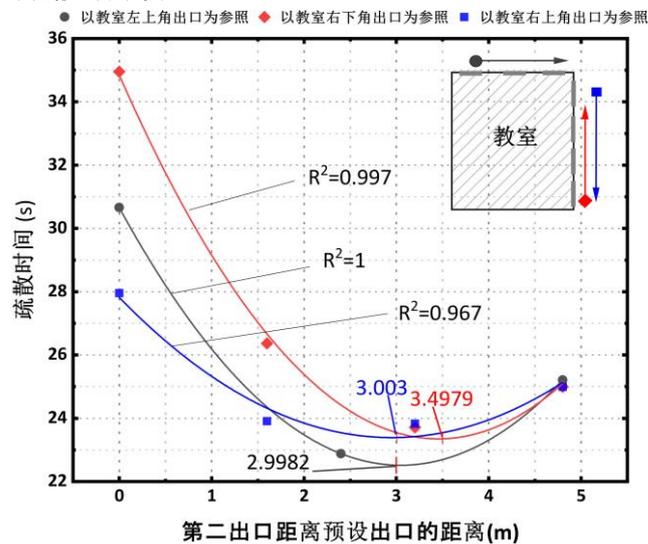


图 8 出口相距距离影响下平均疏散时间非线性预测模型。（图片来源：作者自绘）

表 4 出口相距距离影响下平均疏散时间非线性预测模型参数（表格来源：作者自绘）

模型编号	模型参数名称	参数值	R ²
1	Intercept(截距)	30.6589	1 *
	B1	5.34483	
	B2	0.87696	
2	Intercept(截距)	34.85243	0.99745 *
	B1	-6.66058	
	B2	0.96414	
3	Intercept(截距)	27.82066	0.96699 *
	B1	-3.00409	
	B2	0.50915	

R² 值在 0.7-1 之间，模型拟合极好

- 1，后端出口相距距离影响下平均疏散时间预测模型 1（以左上角出口位置作为参照系）
- 2，侧端出口相距距离影响下平均疏散时间的关系模型 2（以右下角出口位置作为参照系）
- 3，侧端出口相距距离影响下平均疏散时间的关系模型 3（以右上角出口位置作为参照系）

结语

在这项关于培智类学校教室的疏散研究中，我们通过对智力障碍儿童疏散演练的观察发现了智力障碍儿童在疏散过程中的特殊的疏散行为。根据调查情况构建了智力障碍儿童教室疏散模型。在疏散模型的基础上探索了 16 种教室出口布局与智力障碍儿童疏散时间的关系。通过这一

研究，我们旨在为今后的培智学校教学空间设计提供参考，对建筑规范的制定提供依据。以下是我们的研究结论：

1. 当教室只能开设一个出口的情况时，在教室的后端开设出口应为第一选择。最佳布局为 g1 布局，即在教室后端中间位置开设出口。不建议在教室前端开设出口。在教室后端位置开设出口，整体疏散时间最短，平均疏散时间相较于教室前端减少了 46.32%，相较于教室侧端减少了 4.88%。

2. 教室开设两个出口的情况下，在教室的后端开设出口应为第一选择，在教室侧端开设出口可为第二选择。不建议在教室前端开设出口。在教室后端位置开设出口，整体疏散时间最短，平均疏散时间相较于教室前端减少了 50.32%，相较于教室侧端则相差不大，其平均疏散时间分别为 24.05s 与 24.42s。

3. 智力障碍儿童的平均疏散时间随着两个疏散门之间的距离增大呈现先减少后增大的趋势。在教室侧端、后端开设出口时，当另一出口距离端部出口距离在 2m-4m 之间时，疏散时间最短。

4. 智力障碍儿童所处教学空间，建议设置两个出口。与开设一个出口的情况而言，开设两个出口的教室更有利于智力障碍儿童的疏散，他们的平均疏散时间减少了 12.99%。

5. 在 16 种教室出口布局中，出口的最佳位置为 c2 布局。即在教室后端开设两个出口，其中一个位于后端的边缘，另一个位于后端的中间位置，两个出口之间的距离为 2.4m

未来的研究可以在两方面进行探讨，首先需要对智力障碍儿童的疏散行为进行更加深入的研究，从而弥补这类人群的研究空白。其次，在本研究的基础上，扩展疏散场景，关注培智类学校教室内部障碍物布置、空间组织、走廊空间、楼梯空间等场景的疏散问题。

参考文献

- [1] DISABILITIES A A O I A D. Defining Criteria for Intellectual Disability: [S]. 2023:
- [2] AMERICAN PSYCHIATRIC ASSOCIATION D, ASSOCIATION A P. Diagnostic and statistical manual of mental disorders: DSM-5 [M]. American psychiatric association Washington, DC, 2013.
- [3] HOSTETTER H, NASER M Z, RANDALL K, et al. Evacuation preparedness and intellectual disability: Insights from a university fire drill [J]. Journal of Building Engineering, 2024, 84: 108578.
- [4] Residential Building Fires Involving Individuals with Mental Disabilities [Z]. U. S. Fire Administration. 2011.
- [5] LEONARD R. Mass evacuation in disasters [J]. The Journal of emergency medicine, 1985, 2(4): 279-86.
- [6] AO Y, ZHANG H, YANG L, et al. Impacts of earthquake knowledge and risk perception on earthquake preparedness of rural residents [J]. Natural Hazards, 2021, 107(2): 1287-310.
- [7] ŠAKIĆ TROGRLIĆ R, VAN DEN HOMBERG M, BUDIMIR M, et al. Early warning systems and their role in disaster risk reduction [M]. Towards the “perfect” weather warning: bridging disciplinary gaps through partnership and communication. Springer International Publishing Cham. 2022: 11-46.
- [8] BOLIAN B, LAKSHAY. Efficient evacuation strategies for emergency response management [J]. Journal of emergency management (Weston, Mass), 2022, 20(2): 175-96.
- [9] LU S, LIU W, WENG X, et al. Study on Evacuation Strategy in High-Rise Buildings Fire; proceedings of the 3rd International Conference on Manufacturing Science and Engineering (ICMSE 2012), Xiamen, PEOPLES R CHINA, F 2012 Mar 27-29, 2012 [C]. 2012.
- [10] WANG G, CHEN T, HU X, et al. Wall-following searching or area coverage searching? Simulation study of the panic evacuation considering the guidance of a single rescuer [J]. Physica a-Statistical Mechanics and Its Applications, 2022, 603.
- [11] HUO F, LI Y, MA Y, et al. CA model considering environmental familiarity and evacuation strategy [J]. China Safety Science Journal (CSSJ), 2022, 32(9): 94-9.
- [12] TRIVEDIA, RAO S. Agent-Based Modeling of Emergency Evacuations Considering Human Panic Behavior [J]. Ieee Transactions on Computational Social Systems, 2018, 5(1): 277-88.
- [13] ZHANG L, LIU J, TAN S. Multi-exit Evacuation Strategy Based on Particle Swarm Optimization with Background Field [J]. Journal of Northeastern University Natural Science, 2019, 40(9): 1222-7.
- [14] GUAN J, WANG K, YANG J. Towards strategy evolution in pedestrian room evacuation [J]. International Journal of Modern Physics C, 2021, 32(12).

- [15] XIE R, ZLATANOVA S, BRIAN J L. 3D indoor environments in pedestrian evacuation simulations [J]. *Automation in Construction*, 2022, 144
- [16] ZHOU S, IEEE. Study on the evacuation simulation based on cellular automata; proceedings of the International Conference on Information Technology and Computer Science, Kiev, UKRAINE, F 2009 Jul 25-26, 2009 [C]. 2009.
- [17] XIONG K, WENG M, LIU F, et al. Numerical Study on Evacuation Evaluation and Strategy of Theater with Rotating Auditorium [J]. *Buildings*, 2022, 12(8).
- [18] LIAN H, ZHANG S, LI G, et al. Pedestrian Simulation on Evacuation Behavior in Teaching Building of Primary School Emergencies and Optimized Design [J]. *Buildings*, 2023, 13(7).
- [19] ZHU X-M, CHEN Y, JIA W. Research on Space Design of General Classroom Units in Schools for Intellectually Disabled Children Based on Special Needs [J]. *Architectural Journal*, 2022, S 1: 117-24.
- [20] LU L, JI J, ZHAI C, et al. Research on the Influence of Narrow and Long Obstacles with Regular Configuration on Crowd Evacuation Efficiency Based on Tri-14 Model with an Example of Supermarket [J]. *Fire-Switzerland*, 2022, 5(5).
- [21] DELCEA C, COTFAS L-A. Increasing awareness in classroom evacuation situations using agent-based modeling [J]. *Physica a-Statistical Mechanics and Its Applications*, 2019, 523: 1400-18.
- [22] CHEN L, TANG T-Q, HUANG H-J, et al. Elementary students' evacuation route choice in a classroom: A questionnaire-based method [J]. *Physica a-Statistical Mechanics and Its Applications*, 2018, 492: 1066-74.
- [23] RINTALA P, LOOVIS E M. Measuring motor skills in Finnish children with intellectual disabilities [J]. *Perceptual and motor skills*, 2013, 116(1): 294-303.
- [24] SU K, LU M, SHIH H. Disaster Prevention and Protection Operation Plan Development and Trial and Review of Assessment and Rewarding Mechanism for Special Schools Campus [J]. By Consultant Room of Ministry of Education, 2009.
- [25] LIU R, JIANG D, SHI L. Agent-based simulation of alternative classroom evacuation scenarios [J]. *Frontiers of Architectural Research*, 2016, 5(1): 111-25.
- [26] YANG Y, DU H, YAO G. A Scientometric Research on Applications and Advances of Fire Safety Evacuation in Buildings [J]. *Fire-Switzerland*, 2023, 6(3).
- [27] XIE C-Z, TANG T-Q, ZHANG B-T, et al. Experiment, model, and simulation of the pedestrian flow around a training school classroom during the after-class period [J]. *Simulation-Transactions of the Society for Modeling and Simulation International*, 2022, 98(1): 63-82.
- [28] YANG L, DING N. Evacuation behavior under violent attacks in classrooms based on experiments and interpretable machine learning method [J]. *Safety Science*, 2023, 166.
- [29] YANG L, LIU S, LI J, et al. INFORMATION-BASED EVACUATION EXPERIMENT AND ITS CELLULAR AUTOMATON SIMULATION [J]. *International Journal of Modern Physics C*, 2009, 20(10): 1583-96.
- [30] FANG T, YU J, WU B, et al. Study on Experiment and Numerical Simulation of Evacuation from a Classroom under Emergent Conditions; proceedings of the 7th International Symposium on Safety Science and Technology (ISSST), Hangzhou, PEOPLES R CHINA, F 2010 Oct 26-29, 2010 [C]. 2010.
- [31] HELBING D, ISOBE M, NAGATANI T, et al. Lattice gas simulation of experimentally studied evacuation dynamics [J]. *Physical Review E*, 2003, 67(6).
- [32] GUO X, CHEN J, YOU S, et al. Modeling of pedestrian evacuation under fire emergency based on an extended heterogeneous lattice gas model [J]. *Physica a-Statistical Mechanics and Its Applications*, 2013, 392(9): 1994-2006.
- [33] DELCEA C, COTFAS L-A, PAUN R. Agent-Based Optimization of the Emergency Exits and Desks Placement in Classrooms; proceedings of the 10th International Conference on Computational Collective Intelligence (ICCCI), Bristol, ENGLAND, F 2018 Sep 05-07, 2018 [C]. 2018.
- [34] YUE H, ZHANG J, CHEN W, et al. Simulation of the influence of spatial obstacles on evacuation pedestrian flow in walking facilities [J]. *Physica a-Statistical Mechanics and Its Applications*, 2021, 571.
- [35] ALIZADEH R. A dynamic cellular automaton model for evacuation process with obstacles [J]. *Safety Science*, 2011, 49(2): 315-23.
- [36] ZHU K J, YANG L Z. The effects of exit position and internal layout of classroom on evacuation efficiency [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(11): 7701-7.
- [37] KONTOU P, GEORGOUDAS I G, SIRAKOULIS G C, et al. Cellular Automata Modelling of the Movement of People with Disabilities during Building Evacuation; proceedings of the 26th Euromicro International Conference on Parallel, Distributed, and Network-Based Processing (PDP), Univ Cambridge, Comp Lab, Cambridge, ENGLAND, F Mar 21-23, 2018 [C]. 2018.
- [38] CHEN Y-F, MA K-C, LEE M-H, et al. Earthquake Response for Students with Different Severe Degrees of Disabilities: An Investigation of the Special Education Classes in Primary Schools in Taipei [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(14).
- [39] WATANABE M, KENJO M. Guidance to Children Who Stutter Accompanied by Intellectual Disabilities in Japanese School Education [J]. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 2015, 193: 274-7.
- [40] JEBRIL T, CHEN Y. The architectural strategies of classrooms for intellectually disabled students in primary schools regarding space and environment [J]. *Ain Shams Engineering Journal*, 2021, 12(1): 821-35.
- [41] NAJMANOVA H, RONCHI E. Experimental data about the evacuation of preschool children from nursery schools, Part I: Pre-movement behaviour [J]. *Fire Safety Journal*, 2023, 138.
- [42] CHINA M O E O T P S R O. The Notice from the Office of the Ministry of Education on Issuing the "Guidelines for

- Emergency Evacuation Drills in Primary and Secondary Schools and Kindergartens" [Z]. 2014
- [43] VARAS A, CORNEJO M D, MAINEMER D, et al. Cellular automaton model for evacuation process with obstacles [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2007, 382(2): 631-42.
- [44] LI Y, LI C, GUO C, et al. Dynamic coupling model of FDS and cellular automata considering trampling behavior [J]. *Physica a-Statistical Mechanics and Its Applications*, 2024, 633.