



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2405887

引用格式:朱培,张剑高,王诗琪,等. 高高原机场航空器旅客应急疏散模拟[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(19): 8272-8281.

Zhu Pei, Zhang Jianguo, Wang Shiqi, et al. Simulation of emergency evacuation of aircraft passengers at high plateau airport[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(19): 8272-8281.

高高原机场航空器旅客应急疏散模拟

朱培¹, 张剑高¹, 王诗琪¹, 孙智¹, 邵荃^{1*}, 陈维旺²

(1. 南京航空航天大学, 民航应急科学与技术重点实验室, 南京 211106;

2. 中国民航大学, 民航热灾害防控与应急重点实验室, 天津 300300)

摘要 为探究海拔高度对机场航空器旅客应急疏散的影响,构建机场航空器事故应急疏散仿真模型,通过引入恐慌因子、年龄因子、性别因子以及海拔修正系数,定量表征不同海拔环境下旅客行走速度,分析不同海拔高度、有无疏散引导、舱内过道间距及双航空器碰撞等工况下旅客疏散效果。结果表明:相对于平原,高高原环境下应急疏散时间影响主要体现在舱内疏散中后期和地面疏散阶段;海拔高度 4 280 m 时,与平原地区相比,舱内疏散时间增加 19.6 s,总体疏散时间增加 44.1 s;设置舱内机组人员引导,舱内疏散时间减少 18.1 s,疏散效率提升 16.5%;增加过道间距宽度至 60 cm 时,舱内疏散时间减少了 20.8 s,疏散效率提升 19%;相对于单航空器疏散,双航空器疏散时间显著增加,需要优化疏散策略。本文研究结果可为高高原机场航空器突发事件应急疏散方案优化提供理论支持。

关键词 高高原机场; 航空器事故; 应急疏散; 仿真建模; 优化策略

中图法分类号 U8;

文献标志码 A

Simulation of Emergency Evacuation of Aircraft Passengers at High Plateau Airport

ZHU Pei¹, ZHANG Jian-gao¹, WANG Shi-qi¹, SUN Zhi¹, SHAO Quan^{1*}, CHEN Wei-wang²

(1. Key Laboratory of Civil Aviation Emergency Science and Technology CAAC, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China; 2. Key Laboratory of Civil Aviation Thermal Disaster Prevention and Emergency, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

[Abstract] In order to explore the impact of altitude on the emergency evacuation of aircraft passengers at airports, a simulation model for emergency evacuation of aircraft accidents at airports was built. By introducing panic factor, age factor, gender factor and altitude correction factor, passenger walking speed at different altitudes was quantitatively characterized, and passenger evacuation effects were analyzed under conditions such as different altitudes, with or without evacuation guidance, and cabin aisle spacing, dual aircraft evacuation. The results show that the impact of emergency evacuation time in a high plateau environment is mainly reflected in the middle and late stages of cabin evacuation and ground evacuation. When the altitude is 4 280 m, the cabin evacuation time is increased by 19.6 s and the overall evacuation time is increased by 44.1 s compared with the plain area. By setting cabin crew guidance, cabin evacuation time is reduced by 18.1 s and evacuation efficiency is increased by 16.5%. When the width of aisle spacing is increased to 60 cm, the evacuation time in the cabin is reduced by 20.8 s, and the evacuation efficiency is increased by 19%. Compared with single-aircraft evacuation, the evacuation time of dual-aircraft evacuation is significantly increased, so it is necessary to optimize the evacuation strategy. The research results can provide theoretical support for the optimization of aircraft emergency evacuation schemes at high plateau airport.

[Keywords] high plateau airport; aircraft accident; emergency evacuation; simulation modeling; optimizing strategy

高高原机场是指标高在 2 438 m 以上的机场,而中国拥有高高原机场 25 座,约占全球的 50% 左右。高高原机场存在低压低氧、复杂气象等恶劣环

境,将导致航空器性能下降、人员高原反应等问题,更容易引起飞行区地面航空器事故发生,进而对高高原机场运行安全产生巨大的威胁。因此,探究高

收稿日期: 2024-08-15 修订日期: 2024-12-23

基金项目: 国家自然科学基金(52202416); 中国民航大学民航热灾害防控与应急重点实验室开放基金(RZH2021-KF-02); 南京航空航天大学民航应急科学与技术重点实验室开放基金(NJ2022022, NJ2023025)

第一作者: 朱培(1989—),男,汉族,河南商丘人,博士,讲师。研究方向:航空安全与应急管理。E-mail: zpei@nuaa.edu.cn。

* 通信作者: 邵荃(1981—),男,汉族,湖北鄂州人,博士,教授。研究方向:民航应急管理。E-mail: shaoquan@nuaa.edu.cn。

高原机场飞行区航空器事故应急疏散规律以及策略显得极为重要。

国内外学者开展大量应急疏散效率和策略相关研究。如 Gobbin 等^[1]基于多智能体疏散模型,探究了步行速度、身体尺寸、出口分配等重要参数对疏散时间的影响;焦宇阳^[2]基于人体弹性系数,研究了个体碰撞对疏散效率的影响;谢欣等^[3]基于 Pathfinder 考虑真实人体参数建立大型民用机库疏散仿真模型,并将模拟结果应用于虚拟现实模型构建,开发虚拟现实应急疏散仿真系统;田水承等^[4]研究了客舱中部应急出口布置对应急疏散的影响;刘杰^[5]研究了旅客安全态度对非适应性疏散行为的作用机理,构建了包含安全态度、风险感知和非适应性疏散行为的理论模型;陈琨等^[6]研究了民用飞机典型高密度、多障碍客舱环境下,人员心理状态对疏散瓶颈形成及其变化规律的影响;邵荃等^[7]基于仿真模型探究了机场旅客多阶段应急疏散行为,发现适当的人员引导可以有效降低恐慌因子,减少人员疏散时间;王浩^[8]采用虚拟现实技术开展飞行区突发事件疏散研究,结合旅客舱内舱外不同行为特征,建立了飞行区多阶段旅客应急疏散模型;魏诗雨等^[9]引入惶恐因子和集体关系因素对传统社会力模型进行改进,分析拥挤点产生原因及环境影响因素;齐晓云等^[10]对某航站楼进行仿真模拟,结果表明非适应疏散行为均对疏散效率产生负面影响。刘晓然等^[11]依据人员生理和行为特征进行分类,将不同类别人员组合进行分梯疏散。

针对于高海拔环境下人员运动行为特性的研究,Limmer 等^[12]研究表明指出在极端常压和低气压缺氧暴露期下,人的注意力表现受损;陈汉波^[13]研究了高海拔环境火灾燃烧特性和人体机能变化对疏散速度的影响;贺军等^[14]通过对比高原与平原作业人员的行为状态,发现高海拔环境对视觉选择反应时间、视听注意分配及协调精确操作均有明显影响;Wang 等^[15]研究指出在高海拔环境下心率较高的人通常承受着更大的认知负担;黄磊^[16]经研究发现,控制认知能力的大脑皮层对人体周围环境极其敏感,在高海拔地区低氧环境中,外来进藏人群的认知能力受到极大影响;Liu 等^[17]基于受试者的生理状态,采用神经行为评估系统评估其认知能力,结果表明,高原停留时间和原始居住地海拔对认知能力具有显著影响;李鹏飞等^[18]指出多项研究均表明在高原地区的短时间停留也会导致注意力、执行力和认知等能力的下降。

现通过 Pathfinder 软件进行仿真,重点考虑不同

海拔高度下对人员疏散行为的影响。以 B737-700 为例,设定不同海拔高度下突发事件进行全流程的疏散模拟与优化,得到相对应的仿真数据,分析行为特性,为高高原机场飞行区航空器事故疏散提供参考。

1 应急疏散影响因素分析

1.1 高原低氧对人员运动的影响

文献[13]表明,高海拔地区低氧环境会引起人体无氧代谢,使人体内血乳酸浓度上升,加剧人们的疲劳感,其中人体最大摄氧量起着决定作用。最大摄氧量占海平面百分比与海拔高度关系为

$$P = -10^{-8}H^2 - 2 \times 10^{-5}H + 1 \quad (1)$$

式(1)中: P 为最大摄氧量占海平面百分比; H 为海拔高度,km。

体力劳动负荷可通过测定实际劳动操作过程中的摄氧量来评定,建立跑步速度与摄氧量的关系为

$$V = 0.9158L + 0.5 \quad (2)$$

式(2)中: V 为跑步速度,m/s; L 为最大摄氧量,L/min。

因此,人员逃生速度与海拔高度关系可由式(1)和式(2)获得,而在实际中经过大量实验数据验证^[13],海拔高度对人员速度的影响可用海拔高度修正系数与基准速度的乘积来表示,其中海拔修正系数计算公式为

$$k_H = -0.0124H^2 - 0.0152H + 1 \quad (3)$$

由式(3)计算得出表1不同高度的高高原地区海拔修正系数。

表1 高高原海拔修正系数

Table 1 Altitude correction factors for high plateau areas at different altitudes

高高原机场	高度/m	系数 k_H
林芝米林机场	2 949	0.85
拉萨贡嘎机场	3 570	0.80
甘孜康定机场	4 280	0.70

1.2 恐慌心理影响

在航空器突发事故中,旅客在密闭空间内遭受威胁难免会产生恐慌情绪,极易使旅客在应急疏散过程中产生盲目的从众心理,即盲目地模仿他人行为,导致在疏散过程中某些应急出口被忽略,导致个体的行动减缓或停滞,使疏散时间增加。

1.3 性别影响

从生理角度来看,男性相比女性通常拥有更强的肌肉力量和更高的体能水平,这使得他们在疏散过程中能够更快地奔跑,因此在疏散速度和应对突

发状况方面可能更具优势。而在疏散行为特征上^[8],男性更倾向于自我疏散,而女性更容易产生从众行为。

1.4 年龄影响

随着年龄的增长,人的身体机能会逐渐下降,体力、反应速度、耐力等方面都会受到影响,因此在应急疏散过程中,老年人的行动能力相对较差,可能需要更长的时间才能完成疏散。所以需要根据实际情况在安全管理和应急预案制定过程中,应考虑到不同年龄段人群的特点和需求,为其提供更好的疏散指导和支持。

因此,在应急疏散过程中考虑海拔高度,旅客恐慌情绪,性别和年龄影响,疏散速度。疏散速度 = 基础速度 × 恐慌因子 × 性别因子 × 年龄因子 × k_H ,其中基础速度设定为 3.4 m/s,恐慌因子为 0.8,性别因子^[2]:男性为 1.0,女性为 0.8,年龄因子^[2]:小于 50 岁为 1.0,大于 50 岁为 0.7, k_H 为海拔修正系数,见表 1。

2 仿真模型构建

2.1 Pathfinder 介绍

Pathfinder 是一款基于智能体技术构建的三维模型疏散软件,疏散人员在方向上可以自由前进,没有方向上的束缚,并且拥有较为完善的疏散模块,可以较好地完成疏散过程的仿真模拟。

Pathfinder 软件中对人员运动方式的模拟由两种^[2]: SFPE 模式和 steering 模式。在国际防火保护协会(Society of Fire Protection Engineers, SFPE)模式中人员密度可以决定每个行人的前进速率,人的运动仅是从它当前位置到当前路径点的直线距离。steering 模式使用路径规划、碰撞处理、指导机制相结合的方式控制人员运动,当智能体之间的相对距离和相离最近点的路径超过某一临值,就可以再生新的通向出口的路径,从而实现行人的行走轨迹得改变。本文中使用 Pathfinder 软件来研究飞行区航空器应急疏散的情况。在仿真模拟中,steering 模式更接近现实应急疏散的过程,故人员的运动行为使用 steering 模式。

2.2 steering 决策

在 steering 模式下人智能体路径决策具体流程如下:

(1) 计算当前的期望速度 v_d 以及加速度 a_{max} , 公式为

$$v_d = v_{max} \times \frac{0.85k}{1.19} \quad (4)$$

$$a_{max} = \frac{v_{max}}{t_a} \quad (5)$$

式中: k 为疏散速度系数; v_{max} 为最大前进速度, m/s; t_a 为人员前进时的加速时间, s。

(2) 计算不同方向上的权值 S_e , 公式为

$$S_e = \frac{\theta_i}{2\pi} \quad (6)$$

式(6)中: S_e 为不同方向上的权值; θ_i 为不同方向上与 seek 曲线的夹角,其中 seek 曲线为人员初始位置指向出口方向的一条曲线,在疏散过程中遇到障碍物会重新计算所有方向的权值,并将所有权值方向中最小权值方向作为新的修正 seek 路线方向。

(3) 计算最小权值的方向期望速度 \bar{v}_{des} 以及加速度大小 \bar{a} , 公式为

$$\bar{v}_{des} = |\bar{v}_{des}| \bar{d}_{des} \quad (7)$$

$$\bar{a} = \frac{\bar{v}_{des} - \bar{v}_c}{|\bar{v}_{des} - \bar{v}_c|} a_{max} \quad (8)$$

式中: $|\bar{v}_{des}|$ 为 v_{max} 或者为 0,由仿真程序根据智能体当前的所在位置判断获取; \bar{d}_{des} 为最小权值方向向量; a_{max} 为当前路径上的最大加速度, m/s²; \bar{v}_c 为智能体当前方向上的速度大小, m/s。

(4) 智能体移动到下个位置,表达式为

$$\bar{v}_{next} = \bar{v}_c + \bar{a}\Delta t \quad (9)$$

$$\bar{P}_{next} = \bar{P}_c + \bar{v}_{next}\Delta t \quad (10)$$

式中: \bar{v}_{next} 为智能体下一时刻的速度, m/s; \bar{P}_{next} 为下一时刻的位置; Δt 为更新步长, s。

2.3 人物参数设定

生理属性将从疏散人员性别、年龄、肩宽三个角度出发。根据文献^[19]数据得到表 2。

表 2 人物数据

Table 2 People data

参数	男士(18~60岁)				女士(18~55岁)			
肩宽/mm	398	431	460	486	363	397	428	458

为方便仿真模拟,男性肩宽统一为 490 mm,女性肩宽统一为 460 mm。

根据运输类飞机适航标准 CCAR25-R4^[20]中对 90 s 应急撤离模拟实验的要求:至少 40% 是女性;至少 35% 以上是 50 岁以上的人;至少 15% 是女性且年龄 50 岁以上。设置人员比例由表 3 所示。

表 3 疏散人员性别年龄比例

Table 3 Sex to age ratio of evacuees

参数	性别	18~50岁	50~60岁
比例/%	男	32	18
	女	32	18

2.4 模型构建

考虑航空器疏散三阶段模型(图1),即舱内疏散,应急滑梯疏散,地面疏散。以单个航空器左翼起火和两个航空碰撞等事故情景为例,疏散过程包括旅客从舱内疏散至距离乘客座位最近的应急出口,然后从应急出口通过疏散滑梯至地面,最后到达航空器上风向集结点处。

(1)客舱模型。选择 B737-700 作为客舱模型(图2),B737-700 是中国可以完成高高原运输作业的三大机型之一。机长为 33.6 m,客舱座位数共计 128 个,飞机两侧各有 3 个安全应急出口(R1、R2、R3、L1、L2、L3),客舱过道间距为 50 cm。

(2)滑梯模型。B737-700 离地面高度不高,故在遇到突发事件中,前后均设置应急滑梯为乘客使用,中部应急疏散出口滑梯采用下放襟翼的方式让乘客下滑逃生。为保障疏散效率和安全,故中部滑梯下滑角设置为 40°,滑梯长度根据下滑角度以及离地面高度计算为 3.4 m,其模型如图 3 所示。本文假设所有乘客从应急舱门逃生以后皆从应急滑梯

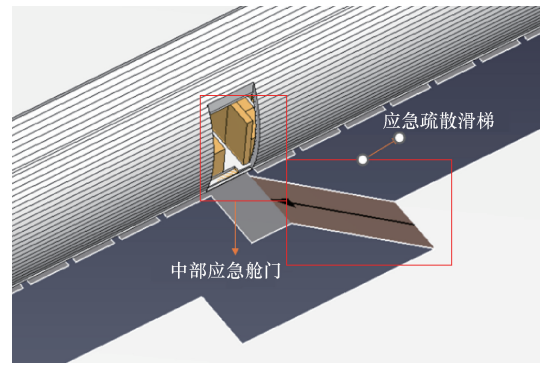


图3 中部应急疏散滑梯

Fig.3 Central emergency evacuation slide

逃离,根据文献[17]中处理得到人员的平均下滑时间为 1.5 s。

(3)地面模型。地面阶段主要指从客舱各舱门落地之后,到达集结点区域这一过程。因为在外开阔空间,不受客舱狭小空间影响,疏散过程主要受旅客个体生理心理等特征的影响。根据文献[8]可知,通常在机场应急救援中救援集结点应该至少设置在距离航空器事故点上风向 100 m 的位置,实际中集结点位置要结合具体机场的气象环境和航空器事故规模做出决策判断,而本文研究中设置距离航空器事故点上风向 100 m 处为集结点位置。

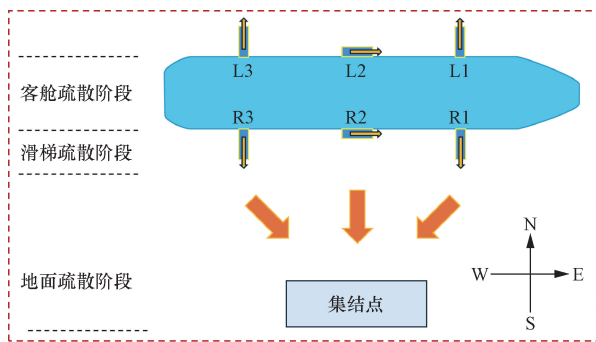


图1 多阶段疏散过程示意图

Fig.1 Diagram of the multi-stage evacuation process

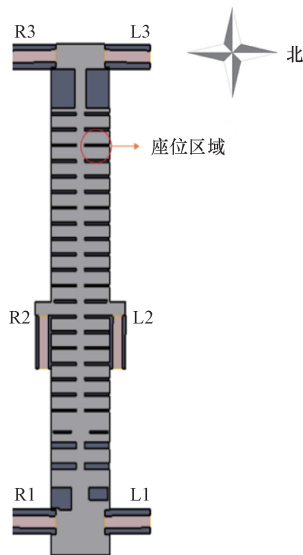


图2 单航空器仿真模型

Fig.2 Single aircraft simulation model

3 仿真结果分析与讨论

3.1 工况 1 仿真分析

将三个不同高度的高高原机场设定为仿真实验场景,设定高度分别为 2 949、3 570、4 280 m,同时设定平原地区的疏散过程为对照组,其他参数均保持不变。具体工况如表 4 所示。

由表 5 仿真结果表明,方案 1 舱内疏散时间和总共疏散时间最短,方案 4 舱内疏散时间和总共疏散时间最长,在客舱疏散阶段方案 4 受海拔高度的影响疏散时间要比对照组的疏散时间多 21.4%。方案 2 与方案 3、方案 4 舱内疏散时间分别相差 4.6 s 和 13.7 s。可以看出随着海拔上升,高原反应对客舱疏散阶段的人员疏散影响也逐步上升。

图 4 所示为不同海拔高度的舱内疏散人数随时间变化结果,可知,前 20 s 内各方案舱内疏散效率差异不大,可能是因为疏散初期人员过于密集造成

表 4 工况表 1

Table 4 Condition table1

方案	海拔/m	风向	应急出口	过道间距/cm
1	0	南	R1、R2、R3	50
2	2 949	南	R1、R2、R3	50
3	3 570	南	R1、R2、R3	50
4	4 280	南	R1、R2、R3	50

表5 不同海拔高度下疏散仿真数据
Table 5 Evacuate simulation data under different altitudes

方案	海拔/m	舱内疏散时间/s	总共疏散时间/s
1	0	89.8	156.4
2	2 949	95.7	174.9
3	3 570	99.1	178.4
4	4 280	109.4	200.5

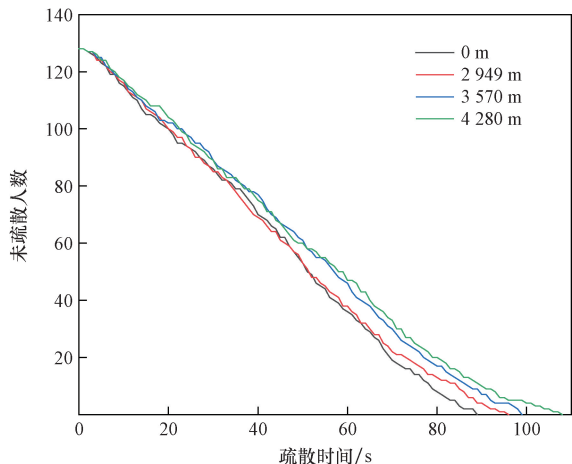


图4 不同海拔高度下客舱内未疏散人数
时间变化结果

Fig. 4 Time variation result of the number of unevacuated persons in the cabin under different altitudes

拥堵导致的,而在 40 s 后,不同海拔下疏散效率差异增加,可能是因为大量舱内人员进入地面阶段,客舱内部变得宽松,舱内疏散人员只会受到障碍物以及少量人群的阻碍,高原反应影响增加,导致疏散效率下降。

图5 所示为不同海拔高度下地面阶段疏散人数时间变化结果,前半段由于乘客尚未抵达集结区,从客舱疏散到地面的人数不断增加,当有乘客抵达集结区,地面阶段人数逐渐减少,当地面阶段的总人数为0时,说明所有乘客到达集结区,完成疏散。可以从图4和图5中看出不同海拔高度之间的疏散效率差异,主要表现在后半阶段,即高海拔环境下客舱阶段末期和地面阶段的人员疏散效率降低,其中方案4的总体疏散时间要比对照组的疏散时间多44.1 s,高达29.8%。

图6 所示为海拔0 m和4 280 m时旅客停留时间密度图,可以看出海拔4 280 m时,R2舱门附近的旅客停留时间密度更大,说明多数乘客选择R2通过,客舱中后部区域旅客停留时间密度更大,说明拥堵情况严重,这说明随着海拔上升,高原反应影响加重,乘客行动能力大幅度下降,导致客舱内疏散效率低下。

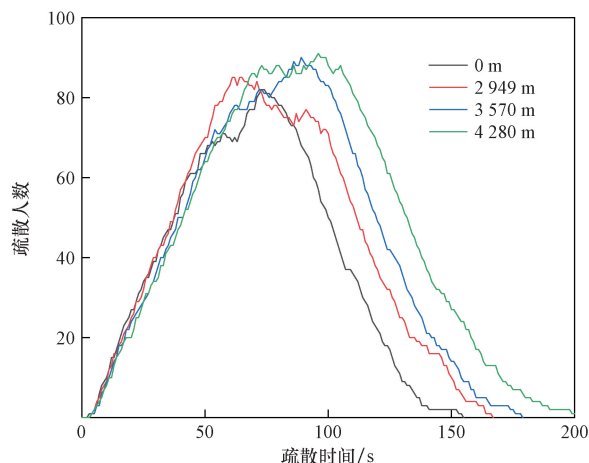


图5 不同海拔高度下地面阶段疏散人数时间变化结果
Fig. 5 Results of time variation of the number of evacuees at ground stage under different altitudes

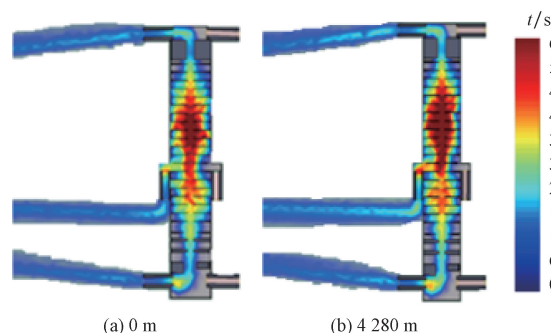


图6 海拔0 m和4 280 m时旅客停留时间密度图
Fig. 6 Density map of passenger stay time at altitude of 0 m and 4 280 m

3.2 工况2 仿真分析

在工况1的基础上,通过加强舱内的引导,可以有效缓解中后部舱内拥堵情况,提升疏散效率。以4 280 m海拔为例,通过仿真模拟,得到表6所示结果,发现与未引导相比,引导后舱内疏散时间减少了18.1 s,舱内疏散效率提升了16.5%;总共疏散时间减少10.3 s,总疏散效率提升了5%。

图7 所示为有无引导情况下舱内未疏散人数时间变化结果。对于舱内疏散,有无人员的引导在疏散前16 s时并没有显著差距,分析其原因为一开始机组人员在进行人员引导时,使得人员有序排队进行疏散。

图8 所示为有无引导时旅客停留时间密度图。从中可以看出,加入机组人员引导后客舱内中后部

表6 有无引导时疏散仿真数据
Table 6 Evacuate simulation data with or without guidance

方案	舱内疏散时间/s	总共疏散时间/s
未引导	109.4	200.5
引导	91.3	190.2

红色区域几乎消失,在一定程度上降低了旅客的恐慌心理,有效地减缓了拥挤,盲目跟从,竞争占位等现象,疏散效率得到提高。

图9所示为有无引导时旅客疏散路线图。从中看出加入机组人员引导后,舱内中后部乘客疏散路径

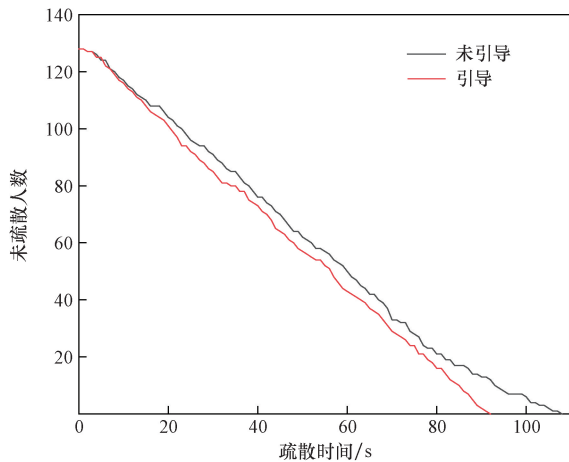


图7 有无引导时客舱内未疏散人数时间变化结果

Fig. 7 Time variation result of the number of unevacuated persons in the cabin with or without guidance

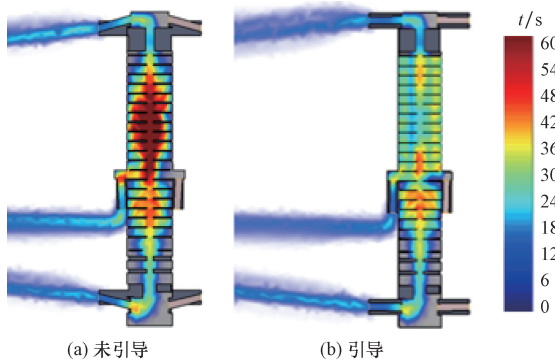


图8 有无引导时旅客停留时间密度图

Fig. 8 Density map of passenger stay time with or without guidance

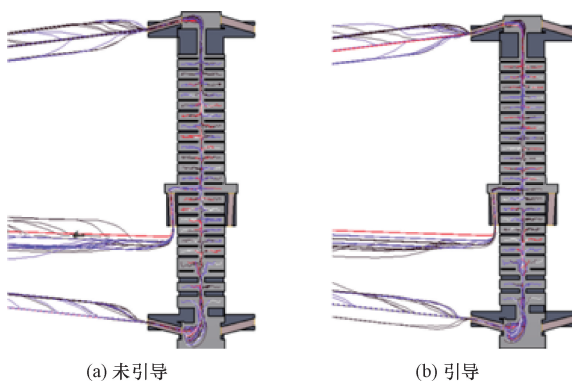


图9 有无引导时旅客疏散路线图

Fig. 9 Diagram of passenger evacuation paths with or without guidance

更加平滑,说明乘客恐慌情绪降低,不会随意拥挤。在地面阶段看出,通过舱内引导,从R2逃生的乘客疏散路线明显减少,而从R1R3逃生的疏散路线增加,且由于R1、R3位置距离集结区域比R2更远,会导致地面阶段疏散时间增加,但在突发事件中应尽快组织旅客从航空器中疏散。

3.3 工况3 仿真分析

进一步通过适当增加过道间距,由50 cm增加至60 cm,仿真结果如表7所示,并与表5对比,可知海拔0 m和4 280 m时,舱内疏散时间分别减少了8.6 s和6.7 s,疏散效率有所提高。

表7 不同海拔高度下过道间距60 cm疏散仿真数据

Table 7 Evacuation simulation data with aisle spacing of 60 cm at different altitudes

海拔/m	舱内疏散时间/s	总共疏散时间/s
0	81.2	146.7
2 949	88.4	164.8
3 570	94.7	169.8
4 280	102.7	199.7

图10所示为不同海拔高度和不同过道间距下舱内疏散人数随时间变化结果。可知,随着海拔不断增高,疏散人数差距变大的时间点在不断往后延伸,图10(d)更为明显,分析原因可能是因为在高海拔地区虽然过道间距增加,但在疏散前期同一时间从座位离开走向过道的人也变多,造成拥挤,同时又因为高原反应的影响,拥挤持续时间很长,导致疏散效率不高。而在疏散末期,随着舱内人数大幅度下降,拥堵情况才得以缓解。

图11所示为海拔4 280 m不同过道宽度下旅客停留时间密度图。从中可以看出过道宽度增加,舱内人流密度明显减小,且应急出口R1与R3周边人流密度也相应减小,说明客舱中后部乘客停留时间减少,客舱中部拥堵情况得到缓解,可以更快地从应急舱门逃生,提升了疏散效率。

图12所示为不同客舱过道宽度下疏散路线图。结果表明过道间距增大,疏散路线上可以容纳的人数变多,往往过道处有3~4人,过道内疏散路线明显变多,提高了疏散效率。但高海拔地区受高原反应影响,拥堵情况更为严重,需要加强引导疏散降低其他事故诞生的风险。

3.4 工况4 仿真分析

在实际中航空器碰撞事故时有发生,相对于单个航空器疏散,实现两个航空器碰撞后的紧急疏散更有挑战性。进一步探究不同海拔高度下航空器碰撞情景下双航空器应急疏散效率,碰撞示意图如图13所示,其中过道间距为50 cm,且无引导措施,

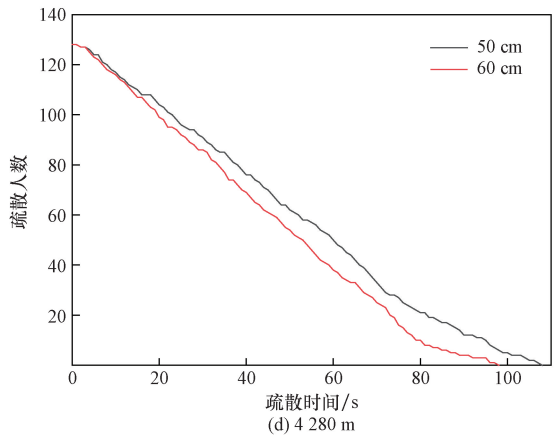
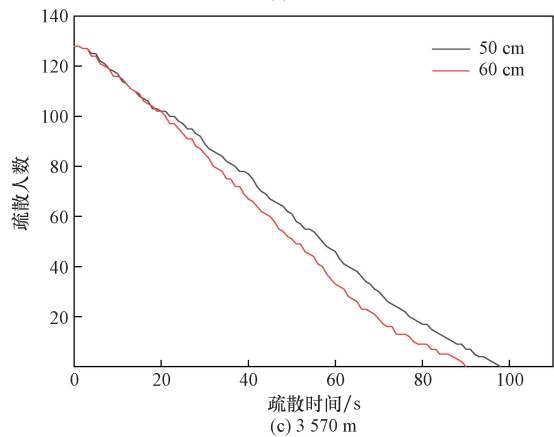
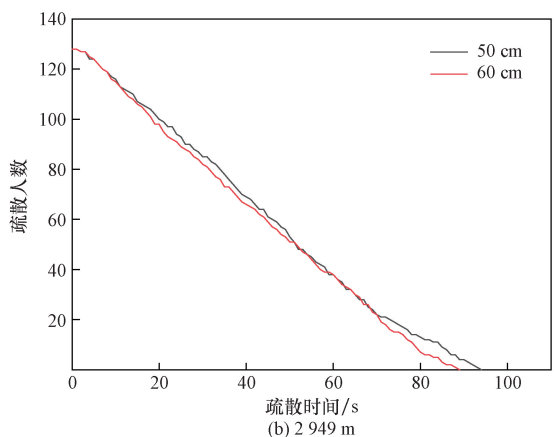
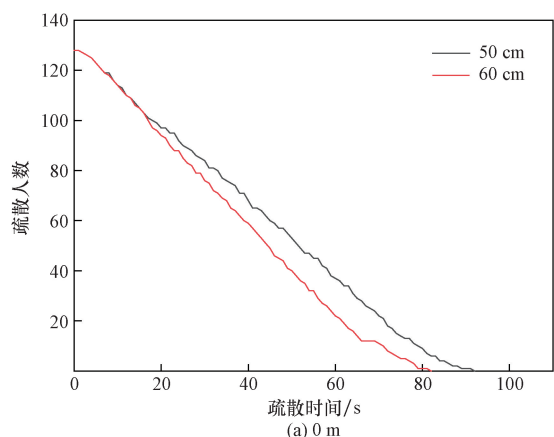


图 10 不同客舱过道宽度下舱内疏散人数时间变化结果
Fig. 10 Evacuation time under different cabin aisle widths

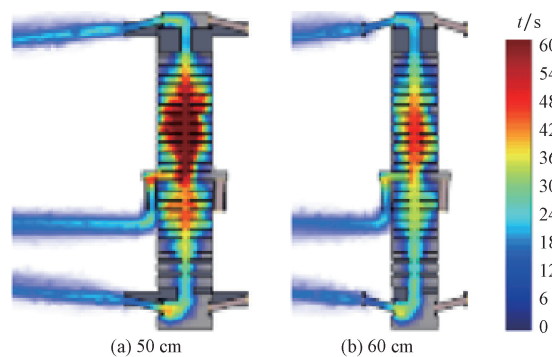


图 11 不同过道间距下累计时间密度图
Fig. 11 Cumulative time density map of different aisle spacing

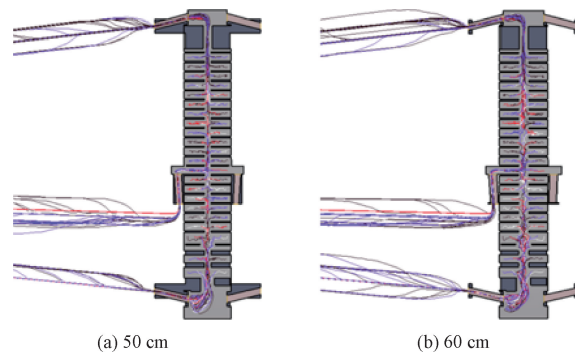


图 12 不同客舱过道宽度下疏散路线图
Fig. 12 Diagram of evacuation paths under different cabin aisle widths

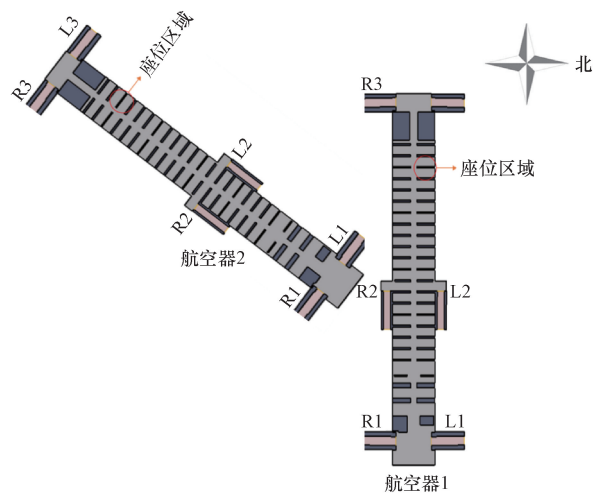


图 13 双航空器仿真模型
Fig. 13 Dual aircraft simulation model

碰撞角度为 60°;航空器 1 右侧中部与航空器 2 端部相撞,从安全性考虑,航空器 1 应急出口打开方案为 L1、L2、L3,而航空器 2 的应急出口打开方案为 R2、R3、L2、L3;风向选择西南风和南风(主要决定集结点位置),海拔高度 0 m 和 4 280 m;详细工况见表 8。

表 9 所示为各方案下疏散时间结果。对比方案 1

表 8 工况 4 列表

Table 8 Condition table 4

方案	海拔/m	风向	航空器 1	航空器 2	碰撞角度/(°)
1	0	南	L1、L2、L3	R2、R3、L2、L3	60
2	0	西南	L1、L2、L3	R2、R3、L2、L3	60
3	4 280	南	L1、L2、L3	R2、R3、L2、L3	60
4	4 280	西南	L1、L2、L3	R2、R3、L2、L3	60

表 9 疏散仿真数据

Table 9 Evacuate simulation data

方案	舱内疏散时间/s		总共疏散时间/s
	航空器 1	航空器 2	
1	86.1	148.1	194.0
2	99.2	136.5	183.1
3	110.4	163.4	235.1
4	125.6	155.5	231.9

和方案 3,风向为南风时,海拔 0 m 时航空器 1 舱内疏散时间平均值为 86.1 s,航空器 2 的舱内疏散平均时间为 148.1 s,总疏散时间为 194 s;海拔 4 280 m 时,航空器 1 舱内疏散时间平均值为 110.4 s,航空器 2 舱内疏散时间平均值为 163.4 s,总疏散时间为 235.1 s。航空器 2 舱内疏散时间均远大于航空器 1 的疏散时间,这主要受可用疏散舱门数量的影响,对航空器 2,虽然可用舱门有 4 个,但是旅客更愿意选择靠近集结点一侧的舱门进行逃生,导致最终出现拥堵现象;同样,高海拔环境下疏散时间均明显增加,降低疏散效率。

对比表 5 方案 1,可知,相对于单航空器,海拔 0 m 时双航空器总疏散时间增加了 48 s 左右;对比表 5 方案 4,可知,海拔 4 280 m 时双架航空器疏散总时间增加了 35 s。由于两架航空器乘客数量大幅度增多,而可用舱门数量相对有限,且航空器 2 舱内疏散时间增加,航空器 1 乘客疏散过程需要绕过航空器 2 也会适当增加疏散时间。而对比表 9 方案 1 和方案 2,及方案 3 和方案 4,可以发现,风向也会适当影响疏散时间,这主要取决于集结点与事故航空器相对位置。

图 14 所示为不同海拔高度下地面阶段疏散人数时间变化结果。同样可以看出,不同海拔下疏散效率差异主要体现在后半阶段,且高海拔环境下客舱阶段末期和地面阶段的人员疏散时间相对增加。

图 15 和图 16 所示为方案 1~4 旅客停留时间密度图。很明显可以看出两种集结点位置工况下高海拔环境时停留时间密度更大,疏散效率较低,更难疏散;且相对于航空器 1,航空器 2 舱内密度深红色区域更多,说明从航空器 2 疏散速度更慢;对比不同集结点,当西南风向时,同样航空器 1 和舱内时间密度增加,疏散时间增加,这是因为集结点位置改,

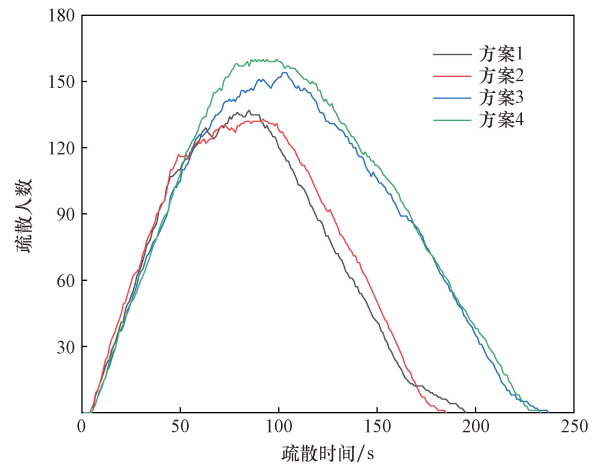


图 14 不同海拔高度疏散人数时间变化结果
Fig. 14 Time variation of the evacuation number at different altitudes

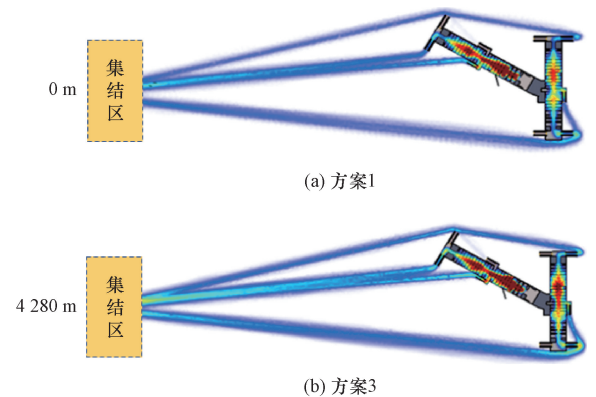


图 15 方案 1 和方案 3 旅客停留时间密度图
Fig. 15 Cumulative time density plot of scenario 1 and scenario 3

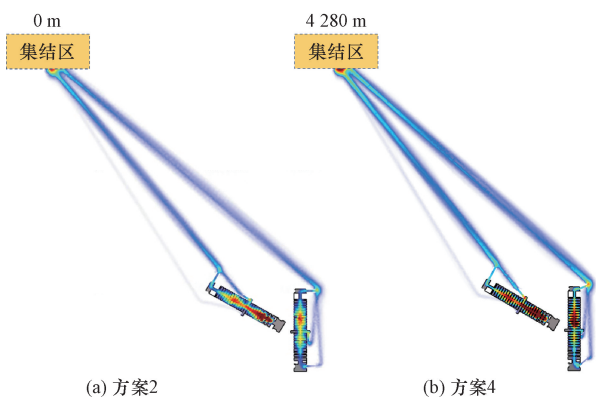


图 16 方案 2 和方案 4 旅客停留时间密度图
Fig. 16 Cumulative time density plot of scenario 2 and scenario 4

舱内旅客选择的可用舱门也会随着就近原则改变,最终疏散路线改变导致整体疏散效率降低。因此,当两个航空器发生碰撞事故后,紧急疏散中需要选择合适的集结点位置和可用疏散舱门数量,同时增

加疏散引导,避免由于人员从众行为导致可用舱门失效。

4 结论

采用 Pathfinder 疏散仿真平台,开展了不同海拔高度机场环境下航空器事故旅客疏散模拟,得到如下主要结果。

(1)随着海拔高度上升,航空器旅客疏散时间增加,高海拔影响主要集中在舱内疏散末期和地面阶段疏散阶段。海拔 4 280 m 时舱内疏散时间和总体疏散时间分别高达 109.4 s 和 200.5 s,与平原地区相比,舱内疏散时间增加 19.6 s,总体疏散时间增加 44.1 s。

(2)针对舱内拥堵造成疏散效率降低问题,海拔高度 4 280 m 时,通过加强舱内机组人员引导,舱内疏散时间减少了 18.1 s,疏散效率提升 16.5%,总体疏散时间减少了 10.3 s,疏散效率提升 5%;通过增加过道间距宽度,舱内疏散时间减少 6.7 s,疏散效率稍微有所提高。

(3)相对于单航空器疏散,双航空器疏散时间显著增加,主要由于总疏散人数增加前提下,可用舱门数量有限,且疏散路径受到双航空器影响而增加,在高高原机场环境下需要适当增加疏散引导。

因此,对于实际中高高原机场航空器事故发生时,在保证集结点位置安全前提下,应优化疏散程序,为总体疏散争取更多有效时间;同时重点加强舱内机组人员引导和优化可用舱门方案,进而提高应急疏散效率。

参 考 文 献

- [1] Gobbin A, Khosravi R, Bardenhagen A. Emergency evacuation simulation of commercial aircraft: influence of body-and behaviour parameters[J]. SN Applied Sciences, 2021, 3(4): 446.
- [2] 焦宇阳. 基于社会力模型改进的火灾疏散建模与仿真[D]. 北京:北京建筑大学, 2019.
Jiao Yuyang. Improved fire evacuation modeling and simulation based on the social force model [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2019.
- [3] 谢欣, 吕辉, 滕黛洁, 等. 基于 Pathfinder 和虚拟现实的民用机库应急疏散仿真[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(22): 9664-9671.
Xie Xin, Lü Hui, Teng Daijie, et al. Emergency evacuation simulation of civil hangar based on pathfinder and virtual reality[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(22): 9664-9671.
- [4] 田水承, 王启睿, 陈洋, 等. 民航客舱中部应急出口对人员疏散的影响[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(20): 8413-8417.
Tian Shuicheng, Wang Qirui, Chen Yang, et al. The impact of the central emergency exit of civil aircraft cabin on personnel evacuation [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(20): 8413-8417.
- [5] 刘杰. 机场火灾旅客非适应性疏散行为的影响因素及仿真研究[D]. 天津:中国民航大学, 2023.
Liu Jie. Influencing factors and simulation research on non-adaptive evacuation behavior of passenger under airport [D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2023.
- [6] 陈琨, 冯振宇, 宋娜. 典型民用飞机人员疏散瓶颈规律[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(31): 13053-13060.
Chen Kun, Feng Zhenyu, Song Na. The bottleneck law of evacuation of typical civil aircraft personnel[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(31): 13053-13060.
- [7] 邵荃, 王浩. 民航旅客全流程应急疏散仿真研究[J]. 航空计算技术, 2019, 49(5): 1-6.
Shao Quan, Wang Hao. Simulation study on full-process emergency evacuation of civil aviation passengers[J]. Aeronautical Computing Technology, 2019, 49(5): 1-6.
- [8] 王浩. 基于虚拟现实的飞行区应急疏散技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2020.
Wang Hao. Research on airfield emergency evacuation technology based on virtual reality [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020.
- [9] 魏诗雨, 刘勇. 改进社会力模型的飞机火灾一体化疏散仿真优化[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(33): 13942-13948.
Wei Shiyu, Liu Yong. Simulation optimization of aircraft fire integration evacuation based on improved social force model[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(33): 13942-13948.
- [10] 齐晓云, 李文磊, 刘杰. 考虑非适应性疏散行为的航站楼应急疏散[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(7): 3106-3114.
Qi Xiaoyun, Li Wenlei, Liu Jie. Emergency evacuation of airport terminals considering non-adaptive evacuation behavior [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(7): 3106-3114.
- [11] 刘晓然, 丰慧, 曾德民, 等. 考虑弱势群体疏散行为特征的高层住院楼疏散仿真及优化[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(2): 715-722.
Liu Xiaoran, Feng Hui, Zeng Demin, et al. Simulation and optimization of considering evacuation behavior characteristics of vulnerable groups within high-rise hospital buildings [J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(2): 715-722.
- [12] Limmer M, Platen P. The influence of hypoxia and prolonged exercise on attentional performance at high and extreme altitudes: a pilot study[J]. PLoS One, 2018, 13(10): e0205285.
- [13] 陈汉波. 巴朗山高海拔单洞对向交通公路隧道火灾疏散救援研究[D]. 成都:西南交通大学, 2014.
Chen Hanbo. Study on fire evacuation and rescue for single-tunnel subtented traffic in Balangshan high altitude road tunnel [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.
- [14] 贺军, 万红, 考希宾, 等. 高原环境对乘员作业能力的影响研究[J]. 人类工效学, 2023, 29(4): 53-56.
He Jun, Wan Hong, Kao Xibin, et al. Study on the effect of plateau environment on crew operating ability[J]. Chinese Journal of Ergonomics, 2023, 29(4): 53-56.
- [15] Wang N, Yu S, Dang P, et al. Association between the acceleration of access to visual awareness of grating orientation with higher heart rate at high altitude [J]. Physiology & Behavior, 2023, 268: 114235.
- [16] 黄磊. 高海拔地区低氧环境对进藏人群认知能力的影响规律研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2021.

- Huang Lei. Study on the influence pattern of low oxygen environment at high altitude on the cognitive ability of people entering Tibet[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2021.
- [17] Liu Y, Huang L, Song C, et al. Effect of hypoxia on human cognitive ability and indoor oxygen environment demand for sojourners at high altitude [J]. Building and Environment, 2021, 194: 107678.
- [18] 李鹏飞, 石华香, 郭家彬, 等. 高原环境低氧对认知功能的影响及其防护研究进展[J]. 中国药理学与毒理学杂志, 2022, 36(6): 401-409.
- Li Pengfei, Shi Huaxiang, Guo Jiabin, et al. Advances in research on the effects of hypoxia in plateau environments on cognitive function and its protection [J]. Chinese Journal of Pharmacology and Toxicology, 2022, 36(6): 401-409.
- [19] 张朝倩. 民用机场航站楼火灾仿真与应急疏散研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2021.
- Zhang Chaoqian. Study of fire simulation and emergency evacuation in civil airport terminal[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2021.
- [20] 中国民用航空局. 运输类飞机适航标准: CCAR-25-R4[S]. 北京: 中国民用航空局, 2011.
- Civil Aviation Administration of China. Air worthiness standard for transport aircraft: CCAR-25-R4[S]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2011.