人呼出飞沫和飞沫核的运动传播规律

代慧¹, 赵彬^{1,2*}

1. 清华大学建筑学院建筑技术科学系, 北京 100084;

2. 室内空气质量评价与控制北京市重点实验室, 北京 100084

* 联系人, E-mail: binzhao@tsinghua.edu.cn

2020-05-28 收稿, 2020-08-01 修回, 2020-08-03 接受, 2020-08-04 网络版发表

科技部新型冠状病毒传播与环境的关系及风险防控项目(2020YFC0842500)和国家自然科学基金(52041602)资助

摘要 很多呼吸道传染病均以人呼出的飞沫和飞沫核作为载体进行传播. 了解飞沫和飞沫核的运动传播规律, 不仅对制定有效的传染病工程防治方法具有实用价值, 而且对探索新型冠状病毒(severe acute respiratory syndrome coronavirus 2, SARS-CoV-2)的基本传播机制也具有重要意义. 本文旨在对人体呼出飞沫的粒径分布、蒸发规律和传播距离等方面的研究成果进行梳理和总结. 研究发现, 正常说话、咳嗽和喷嚏所释放飞沫的主要粒径范围分别为10~50、73~100和80~340 μm , 而且小粒径飞沫的数量比大粒径多. 飞沫传播的距离是病毒传播的关键因素, 较大的飞沫能够在移动2.5 m的水平距离之前落地, 是飞沫传播的前提; 较小的飞沫在落地前完全蒸发成飞沫核, 长时间停留在空气中并随气流运动, 是空气传播(气溶胶传播)的前提. 蒸发过程与环境空气的相对湿度(relative humidity, RH)以及飞沫的初始粒径显著相关. 研究结果有助于认识新型冠状病毒通过空气传播的可能性, 从而为工程控制和公共卫生预防提供指导.

关键词 气溶胶, 空气传播, 飞沫蒸发, 传播距离, 新型冠状病毒

新型冠状病毒在全球肆虐, 给世界各国带来了巨大的损失, 引起了全人类的广泛关注. 为了理解这类传染病的传播机制, 人们一直在致力于研究人体呼出的飞沫如何传播病毒. 最近, 美国国立卫生研究院(USA National Institutes of Health)和宾夕法尼亚大学(University of Pennsylvania)的研究人员用激光和照相机对说话产生的飞沫进行可视化研究, 结果表明, 人说话时会释放大量粒径范围处于20~500 μm 的飞沫颗粒^[1,2]. 此外, 在封闭、停滞的空气环境中, 粒径为4 μm 的飞沫核(对应出口时约12~21 μm 的飞沫颗粒)能够在空气中停留8~14 min以上. 这些结果均有助于解释封闭空间内新型冠状病毒更容易传播的现象. 因此, 了解呼吸活动中飞沫和飞沫核(气溶胶)的产生过程、粒径分布以及传播距离对研究疾病传播有着重要意义和帮助.

雾化过程是呼吸活动中飞沫形成的主要原因^[3]. 气流雾化是高速气流与相对缓慢流体相互作用的结果, 受到表面张力、黏度和空气动力的控制, 可发生在呼吸道. 雾化过程中形成的液滴大小很大程度取决于不同的呼吸模式. 对于人类呼吸活动而言, 不同的呼吸模式具有明显不同的生物动力学机制^[4]. 常见的呼吸模式, 比如正常说话、咳嗽和打喷嚏时所呼出的气流速度不同^[5~7], 则气流在呼吸道引起湍流的激烈程度就不同, 导致呼出液滴的雾化过程有所差异, 从而产生不同数量和粒径分布的飞沫.

据统计, 喷嚏产生的飞沫数量和粒径远大于说话和咳嗽^[8~12]. 研究表明, 飞沫在出口之后经历不同程度的蒸发, 直至完全干化或者在空气环境中的蒸发与凝结作用达到平衡, 则变成“飞沫核”^[13], 且飞沫核携带病

引用格式: 代慧, 赵彬. 人呼出飞沫和飞沫核的运动传播规律. 科学通报, 2021, 66: 493–500

Dai H, Zhao B. Movement and transmission of human exhaled droplets/droplet nuclei (in Chinese). Chin Sci Bull, 2021, 66: 493–500, doi: [10.1360/TB-2020-0643](https://doi.org/10.1360/TB-2020-0643)

毒的能力较强^[14,15]. 关于飞沫核的大小, 也存在着一些不同的观点, 与飞沫的组成成分、初始尺寸以及环境条件密切相关^[16,17].

飞沫的蒸发过程以及飞沫核的大小决定了它们在室内的运动和传播^[18-24]. 较大的飞沫颗粒沉降很快, 在短距离范围内被易感人群吸入或接触, 即为“飞沫传播”; 较小的飞沫颗粒蒸发成“飞沫核”, 随气流长距离运动, 即为“气溶胶传播”(有时也称“空气传播”). 了解这些传播方式有助于制定针对性的传染病预防措施, 为工程控制和公共卫生预防提供指导.

本文对人体呼出飞沫和飞沫核在运动传播方面的研究成果进行梳理和总结, 并实时补充有关新型冠状病毒的病毒粒径、飞沫核粒径以及可能的传播距离等方面的研究^[25-27].

1 飞沫粒径

1.1 粒径分布

粒径的大小对飞沫颗粒的运动和传播有着重要影响, 并进一步影响到传染病的传播. 因此, 准确测量飞沫颗粒的粒径分布对通风系统的设计和感染控制的规划都十分重要. 大量文献提供了相关数据, 但是由于测量方法不同, 结果也不完全一致. 通常认为, 直径小于 $5\ \mu\text{m}$ 的飞沫颗粒为小飞沫, 大于 $5\ \mu\text{m}$ 的飞沫颗粒为大飞沫^[16]. 本文选取有详细粒径分布的文献^[8-12]进行结果对比. 图1总结了这些文献中说话、咳嗽和喷嚏产生的飞沫颗粒的粒径分布和累计频率分布.

1.1.1 说话和咳嗽

研究发现, 说话和咳嗽的粒径分布没有明显差异. 说话产生的飞沫颗粒中, 约82%的粒径尺寸小于 $100\ \mu\text{m}$, 37%小于 $50\ \mu\text{m}$, 3%小于 $20\ \mu\text{m}$. 咳嗽产生的飞沫颗粒中, 相应尺寸的比例分别为64%、20%、2.5%, 而且1.4%小于 $10\ \mu\text{m}$, 大于 $500\ \mu\text{m}$ 的飞沫颗粒占比频率比说话时高. 这是由于说话和咳嗽产生飞沫的机制不同, 咳嗽产生的飞沫粒径大于说话产生的飞沫粒径.

除此之外, 收集方法、呼吸活动的强度、不同种类的食用染剂均会影响唾液的分泌, 从而影响飞沫粒径的大小. 例如, 对于说话时产生的飞沫, Duguid^[8]和Chao等人^[9]的研究中小飞沫偏多, 这是由于不同文献的搜集方法有所差异, 他们的采样点不是位于飞沫产生的原点(口腔), 导致飞沫颗粒经历了不同时间、不同程度的蒸发; Loudon和Roberts^[10]的研究中大粒径飞沫

图1 (网络版彩色)不同呼吸活动下飞沫颗粒的粒径分布(横坐标轴是以2为基底的对数坐标轴). (a) 说话; (b) 咳嗽; (c) 喷嚏. 点与左纵坐标轴对应, 表示等于相应横坐标值的粒径的频率分布; 线与右纵坐标轴对应, 表示小于相应横坐标值的所有粒径的累计频率分布

Figure 1 (Color online) Size distribution of droplets under different respiratory activities (the horizontal axis is 2-based logarithmic). (a) Speaking; (b) coughing; (c) sneezing. The point corresponds to the left vertical axis, indicating the frequency distribution of the particle size equal to the corresponding horizontal value; the line corresponds to the right vertical axis, indicating the cumulative frequency distribution of all droplet sizes smaller than the corresponding horizontal value

颗粒偏多, 这是由于收集飞沫时受试者服用的食用染剂会大大减缓液滴的蒸发. 对于咳嗽时产生的飞沫, 不

同的研究结果有差异是因为受试者的健康状态、呼吸活动的力度各有不同,若是健康的人则很难产生剧烈的咳嗽。总体来说,这些因素很难控制和量化。

1.1.2 喷嚏

Han等人^[11]收集了20名受试者44次喷嚏产生的飞沫,通过测量发现两种明显不同的粒径尺寸分布:单峰型和双峰型。其中,双峰型的粒径分布与之前Duguid^[8]的研究结果相似,峰值处于74~86 μm 的粒径段,占比达到30%;然而,单峰型的粒径分布峰值处于340~400 μm 的粒径段,比Duguid^[8]的研究结果大很多。这是由于喷嚏的生物动力学机制与其他呼吸活动有显著差异,打喷嚏时呼出的气流初始速度约为30~100 m/s^[5-7],远远大于说话和咳嗽的气流初始速度。因此,根据液滴在呼吸道内的雾化机理,喷嚏产生的飞沫在数量和粒径尺寸上均会远大于说话和咳嗽产生的飞沫。而且,Duguid^[8]的研究时间较为久远,不排除由于测量技术有限导致数据不够全面的可能性。因此,存在单峰型的尺寸分布是合理的。

根据以上分析,我们总结得到不同呼吸活动下飞沫颗粒的数量和主要粒径范围,结果如表1。

1.2 临界尺寸

呼吸道传染病通过含有一定病毒载量的飞沫颗粒来传播的概念源于Wessel和Flügge^[18]。病原体从感染者体内释放,附着在飞沫颗粒中随着呼出的气流被排出,不同呼吸活动的初始速度不同,导致飞沫颗粒的运动传播规律不同。Wells^[13]在对空气传播的研究中,采用简单的计算方法得到了一条经典的蒸发-沉降曲线,揭示了飞沫蒸发、粒径大小和沉降速度之间的关系,并首次确定了病毒以飞沫为载体传播的两种主要途径。较大的飞沫颗粒在空气中沉降很快,落地时移动的水平距离较短。这种短距离范围内被易感人群吸入或接触所造成的感染即为通常所说的“飞沫传播”。外科口罩在过滤大飞沫方面具有显著效果^[28],因此可以通过戴口罩来预防飞沫传播。较小的飞沫颗粒蒸发很快,直至完全干化或者在空气环境中蒸发与凝结作用达到平衡,即变成“飞沫核”。在飞沫颗粒弥散的过程中,病原体沉积的飞沫颗粒变成飞沫核之后,能够在空气中停留很长一段时间,也能够通过气流的运动被广泛地弥散(dispersion),这就是所谓的“气溶胶”。这种携带病毒的飞沫核气溶胶长距离运动传播后,被易感人群吸入或接触所造成的感染即为通常所说的“气溶胶传播”(也

表1 不同呼吸活动下飞沫颗粒的粒径尺寸

Table 1 Size of droplets under different respiratory activities

呼吸活动	初始速度(m/s)	粒径总数	主要粒径范围(μm)
说话	5	100~760	10~50
咳嗽	10~20	1100~2000	73~100
喷嚏	30~100	3000~5000	80~340

称“空气传播”)。因此,与疾病传播相关的两个核心问题是:较大飞沫与较小飞沫的粒径是多少?较大飞沫能够移动多远的水平距离?

Wells^[13]首次将“较大的飞沫”定义为粒径大于100 μm 的飞沫颗粒,在2 m的水平距离范围内沉降,即飞沫传播由粒径大于100 μm 的飞沫颗粒造成。但Wells的经典研究是基于各种物理假设之上的简单预测,未考虑环境条件和飞沫组成等因素的影响。在之后的数十年中,大飞沫和空气传播的概念得到延伸,将区别飞沫传播和空气传播的粒径尺寸定义为“临界尺寸”。研究发现,临界尺寸是许多物理参数的函数,如环境湿度、空气速度、环境温度等。本文将飞沫传播造成感染的最远水平距离称为“临界距离”。临界尺寸与临界距离均与飞沫颗粒的蒸发过程密切相关。

2 飞沫蒸发及其影响因素

飞沫颗粒在蒸发成飞沫核的过程中,尤其是接近干化状态时,颗粒中病原体的死亡率大幅增加,增加的程度取决于病原体的种类^[14,15]。虽然大飞沫携带病原体的能力较强,但其深入呼吸道的能力低于小飞沫。总的来说,小飞沫(直径<5 μm)的传染性比大飞沫强^[16,17,29]。一般认为,飞沫核的粒径大小在1~3 μm ^[19,20],主要集中在小于1 μm 的范围内。Yang等人^[30]测量了某卫生中心和飞机上的流感病毒浓度,发现携带病毒的飞沫核中有64%的粒径小于2.5 μm 。因此,蒸发过程是病毒传播的关键因素,与环境空气的相对湿度(relative humidity, RH)以及飞沫的初始尺寸显著相关。

2.1 空气相对湿度

由于飞沫中包含的蛋白质、脂类和碳水化合物等有机聚合物的浓度不同,一般认为飞沫核的直径(d_f)大约是初始液滴直径(d_l)的0.25~0.5倍^[16]。Marr等人^[31]基于开尔文效应建立了一个呼吸液滴的平衡模型。研究发现,低蛋白质含量(3 mg/mL)的飞沫颗粒在RH低于

64%的环境条件下,飞沫核粒径与初始粒径的关系不变($d_r=0.2d_i$), 高蛋白质含量(76 mg/mL)的飞沫颗粒在RH低于42%的环境条件下,飞沫核粒径与初始粒径的关系不变($d_r=0.4d_i$)。当环境的空气相对湿度高于这两个RH值,两种蛋白质含量的飞沫颗粒的 d_r/d_i 均随着RH的增大而增大。这是由于相对湿度高的空气吸收水蒸气的能力较低,可以显著延缓液滴的蒸发过程。

2.2 初始尺寸

初始尺寸是飞沫颗粒蒸发过程中影响飞沫核大小的另一重要因素^[17]。10 μm 的飞沫颗粒迅速蒸发(<0.1 s),受RH的影响不大。50 μm 的飞沫颗粒可以在落地前完全蒸发变成飞沫核,蒸发时间随着RH的增加逐渐增加(约1~10 s)。100 μm 的飞沫颗粒随着RH的增加蒸发过程显著减缓,低RH(<30%)时,大多数飞沫能够在落地前完全蒸发变成飞沫核并随气流运动,但在高RH(>60%)时,蒸发速率大大降低,大多数飞沫在完全蒸发前落地。200 μm 的飞沫颗粒迅速沉降,沉降时间随着RH的减小而稍有增加(约1~5 s)。值得注意的是,该研究的前提是将正常呼吸产生的飞沫简化为纯净的水滴。实际上,除了不溶性核之外,飞沫颗粒还含有钠钾阳离子、氯阴离子、乳酸盐、糖蛋白等组成成分,而且考虑到说话、咳嗽等其他呼吸活动产生的气流速度比正常呼吸大,因此,实际的蒸发速率应该增加,沉降速率应该减小。

综上所述,临界尺寸应该是一个范围,它表征了飞沫从先完全蒸发到先沉降落地的过渡段:这个粒径段范围内的飞沫颗粒能够在相对干燥的空气环境中完全蒸发成粒径足够小的飞沫核,并随气流运动造成远距离的空气传播;也能够相对潮湿的空气环境中缓慢蒸发,由于体积和质量均不足以悬浮在空气中而在临界距离范围内沉降造成飞沫传播。

3 飞沫传播距离

飞沫传播的临界尺寸和临界距离与飞沫的组成、大小、环境条件(温度、湿度、气流速度等)以及气流组织形式有关。研究发现,在不同特定条件下得到的临界尺寸和临界距离不完全相同。根据Liu等人^[32]的研究,当呼吸活动的水平初始速度为5 m/s时,临界尺寸为30~70 μm ;速度增加到10 m/s时,相应粒径也增加到40~80 μm 。Ji等人^[33]综合考虑了热羽和室内气流模式的影响后,认为初始速度1 m/s(正常呼吸)时临界尺寸

是80~130 μm 。Wells^[13]、Wessel和Flügge^[18]最早认为大飞沫的水平移动距离不会超过2 m。Teleman等人^[34]和Embil等人^[35]认为,临界距离在离感染源1或1.5 m处。Xie等人^[14]研究发现,初始速度10 m/s、垂直高度2 m、将飞沫颗粒简化为纯净水滴时,粒径大于60 μm 的飞沫颗粒沉降的水平距离不超过2.5 m。因此,可以合理地认为飞沫传播和空气传播的临界距离为2.5 m。

以下讨论空气相对湿度和飞沫粒径大小、初始速度以及环境风速对飞沫传播距离的影响。

3.1 空气相对湿度和飞沫粒径大小

Liu等人^[32]给出了在两种不同RH下,初始速度为10 m/s的咳嗽射流中飞沫颗粒的运动轨迹。图2显示了不同粒径飞沫移动的水平距离。可以看到,在不考虑湍流的前提下,无论RH如何变化,初始粒径大于80 μm 的飞沫都会在水平距离1.5 m的范围内沉降造成飞沫传播;初始粒径小于40 μm 的飞沫能够到达射流的末端,大约为4 m,之后便悬浮在空气中,通过气流运动在室内弥散造成空气传播;而40~80 μm 临界尺寸内的飞沫最终是沉降还是悬浮与RH密切相关。例如,初始粒径为60 μm 的飞沫颗粒,根据RH的不同传播状态完全不同:在RH为0%时,能够到达射流的末端,以飞沫核的形式悬浮在空气中($d_r=0.32d_i$);而在RH为90%时,飞沫核由于体积变大只能移动1.85 m的距离便沉降到地面($d_r=0.43d_i$)。

图2 (网络版彩色)不同RH下飞沫移动的水平距离,根据文献^[32]作此图(初始盐质量分数为0.9%,初始速度为10 m/s)

Figure 2 (Color online) The horizontal distance of droplet movement under different RH, according to Ref. [32] (the initial salt mass fraction is 0.9%, the initial velocity is 10 m/s)

3.2 初始速度

Xie等人^[14]将飞沫当成盐水处理,采用非等温射流模型对飞沫的蒸发和弥散进行了数值模拟。图3显示了当RH为50%时,与常见呼吸活动对应的初始速度(表1)下飞沫的水平移动距离。可以看到,当初始速度为50 m/s时,所有飞沫均能移动到4 m之外;当初始速度小于50 m/s时,粒径小于30 μm 的飞沫悬浮,大于115 μm 的飞沫沉降。随着初始速度的增加,30~115 μm 临界尺寸飞沫的动量增大,沉降时的水平移动距离增加,但均不超过临界距离2.5 m。

3.3 环境风速

Chen和Zhao^[36]用经过实验验证的数值模拟方法研究人在室内呼出飞沫的弥散特性。结果表明,随着换气次数的增大,粒径在0.1~200 μm 的飞沫颗粒在室内的弥散越剧烈,与室内空气混合越均匀,移动距离也越远。飞沫在室内的具体分布情况与室内气流组织形式有关,目前主要通过基于计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)的方法进行数值模拟研究。

4 讨论

4.1 口罩的作用

外科手术口罩和N95口罩在预防空气传播病毒方面具有重要作用^[28],能够有效地减小呼出射流的范围。

图3 (网络版彩色)不同初始速度下飞沫移动的水平距离,根据文献^[14]作此图(初始盐质量分数为0.9%, RH为50%)

Figure 3 (Color online) The horizontal distance of droplet movement under different initial velocity, according to Ref. [14] (the initial salt mass fraction is 0.9%, the RH is 50%)

口罩阻挡气溶胶颗粒的效率取决于几个因素:通过口罩的气流速度、飞沫粒径分布以及口罩周围漏气的程度。Tang等人^[37]通过光学纹影法对咳嗽产生飞沫的空气流动过程进行可视化研究。结果显示,无论佩戴哪种口罩都存在漏气现象:戴普通外科口罩时,漏气主要集中在口罩的顶和底部;戴N95口罩时,尽管边缘漏气明显减少,但由于口罩内部存在较大压力,迫使少数飞沫直接穿过口罩,形成向前的低速湍流气团(图4(b))。佩戴口罩之后,咳嗽所产生的飞沫动量大大减少,导致飞沫移动的水平距离会缩短至0.5 m以内,并且这些飞沫的运动主要是随着人体的热羽流上升而不是沉积在易感人群表面或者被他们吸入。因此,口罩依然发挥了很大的阻隔和减少病毒传播的作用。

4.2 再悬浮的影响

Liu等人^[21]测量了武汉两家医院不同区域内气溶胶中的病毒RNA,发现含有新型冠状病毒的气溶胶尺寸主要分布在0.25~0.5和0.5~1 μm 两种粒径范围,并提出医务人员防护服以及马桶的表面沉积和再悬浮可能是病毒气溶胶的一个传播途径。You等人^[22]通过测量人在封闭空间内穿不同材质的衣服(洁净室工作服、涤纶运动服、棉衣)、进行不同强度的活动(静坐、轻微活动、剧烈活动)时的颗粒物散发情况,发现对于直径0.3~5 μm 的颗粒物,穿涤纶运动服时的颗粒发生率最高;对于粒径小于2 μm 的颗粒物,活动强度对颗粒发生率影响不显著;对粒径大于2 μm 的颗粒物,颗粒发生率与活动强度呈正相关;而且,颗粒从沉积表面再悬浮需要非常大的动量(风速)。Lai^[23]、Thatcher^[24]对室内颗粒物的沉积和再悬浮进行了总结。研究发现,对于直径0.5和1 μm 的颗粒物,室内平均沉降速率分别为 2.2×10^{-5} 和 9.72×10^{-5} m/s,相应的再悬浮率分别为 2.0×10^{-10} 和 50×10^{-10} s⁻¹。可以看出,再悬浮率的量级远远小于相应平均沉降速率的量级。此结果进一步证实了从沉积表面再悬浮的颗粒相对较少。因此,可以认为,在非专门收治和护理传染病人的场合,由于人体衣服表面不可能沉积大量的病毒气溶胶且病毒气溶胶不易再悬浮,通风条件良好时,以沉积在人体表面的飞沫或者飞沫核的再悬浮为媒介的传播不是空气传播的主要途径。

5 总结

本文对人体呼出飞沫的粒径分布、蒸发规律和传播规律等方面的研究结果进行梳理和总结,主要结论

图4 (网络版彩色)呼出飞沫的运动传播。(a) 不戴口罩, 根据文献[14,32]作此图; (b) 戴口罩, 根据文献[37]作此图

Figure 4 (Color online) Movement and transmission of exhaled droplets. (a) Without mask, according to Ref. [14,32]; (b) with mask, according to Ref. [37]

如下:

(1) 正常说话、咳嗽和喷嚏呼出的飞沫的主要粒径范围分别是10~50、73~100和80~340 μm 。

(2) 飞沫传播和空气传播的临界距离约为2.5 m。

(3) 飞沫核的粒径根据环境条件、飞沫液滴的组成和初始尺寸的不同而不同, 一般认为对空气传播有巨大贡献的飞沫核的粒径大小为1~3 μm , 主要集中在小于1 μm 的范围。

(4) 大于110 μm 的飞沫液滴能够在移动2.5 m的水平距离之前落地, 是飞沫传播的前提; 小于30 μm 的液滴在落地前完全蒸发成飞沫核, 长时间停留在空气中并随气流运动, 是空气传播(气溶胶传播)的前提。30~110 μm 飞沫颗粒的运动和传播规律根据环境条件

和初始速度的不同而不同。

最后需要指出的是, 全球新型冠状病毒肺炎疫情形势仍然相当严峻。Zhu等人^[25]通过透射电子显微镜观察到新型冠状病毒的粒径是0.06~0.14 μm ; Bar-On等人^[26]初步认为, 新型冠状病毒是一种粒径小于0.1 μm 的病毒。Liu等人^[21]通过测量气溶胶中的病毒RNA, 发现含有新型冠状病毒的飞沫核尺寸主要分布在两种粒径范围: 0.25~0.5和0.5~1 μm 。Bourouiba^[27]考虑打喷嚏或咳嗽时的高动量湍流效应, 提出病毒的传播距离最远可达到7~8 m的猜测。然而, 这些结论还处于讨论阶段, 仍然存在许多不确定性。关于携带新型冠状病毒飞沫的粒径范围和传播距离的确定需要更多的详细研究。

参考文献

- 1 Anfinrud P, Stadnytskyi V, Bax C E, et al. Visualizing speech-generated oral fluid droplets with laser light scattering. *N Engl J Med*, 2020, 382: 2061–2063
- 2 Stadnytskyi V, Bax C E, Bax A, et al. The airborne lifetime of small speech droplets and their potential importance in SARS-CoV-2 transmission. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2020, 117: 11875–11877
- 3 Morawska L. Droplet fate in indoor environments, or can we prevent the spread of infection? In: *Indoor Air 2005: Proceedings of the 10th International Conference on Indoor Air Quality and Climate*. Beijing: Tsinghua University Press, 2005. 9–23
- 4 Chao C Y H, Wan M P. A study of the dispersion of expiratory aerosols in unidirectional downward and ceiling-return type airflows using a multiphase approach. *Indoor Air*, 2006, 16: 296–312
- 5 Zhao B, Zhang Z, Li X. Numerical study of the transport of droplets or particles generated by respiratory system indoors. *Build Environ*, 2005, 40: 1032–1039
- 6 Gerone P J, Couch R B, Keefer G V, et al. Assessment of experimental and natural viral aerosols. *Bacteriol Rev*, 1966, 30: 576–588
- 7 Gao N, Niu J. Transient CFD simulation of the respiration process and inter-person exposure assessment. *Build Environ*, 2006, 41: 1214–1222
- 8 Duguid J P. The numbers and the sites of origin of the droplets expelled during expiratory activities. *Edinburgh Med J*, 1945, 52: 385
- 9 Chao C Y H, Wan M P, Morawska L, et al. Characterization of expiration air jets and droplet size distributions immediately at the mouth opening. *J Aerosol Sci*, 2009, 40: 122–133
- 10 Loudon R G, Roberts R M. Droplet expulsion from the respiratory tract. *Am Rev Respir Dis*, 1967, 95: 435–442

- 11 Han Z Y, Weng W G, Huang Q Y. Characterizations of particle size distribution of the droplets exhaled by sneeze. *J R Soc Interface*, 2013, 10: 20130560
- 12 Xie X, Li Y, Sun H, et al. Exhaled droplets due to talking and coughing. *J R Soc Interface*, 2009, 6(Suppl): S703–S714
- 13 Wells W F. On air-borne infection: Study II. Droplets and droplet nuclei. *Am J Epidemiol*, 1934, 20: 611–618
- 14 Xie X, Li Y, Chwang A T Y, et al. How far droplets can move in indoor environments revisiting the Wells evaporation-falling curve. *Indoor Air*, 2007, 17: 211–225
- 15 Ferry R M, Brown W F, Damon E B. Studies of the loss of viability of stored bacterial aerosols death rates of several non-pathogenic organisms in relation to biological and structural characteristics. *Epidemiol Infect*, 1958, 56: 125–150
- 16 Nicas M, Nazaroff W W, Hubbard A. Toward understanding the risk of secondary airborne infection: Emission of respirable pathogens. *J Occup Environ Hyg*, 2005, 2: 143–154
- 17 Qian H, Zhang C Y, Zheng X H. The function of aerosols in transmitting and infecting of respiratory infectious diseases and its risk prediction (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2018, 63: 931–939 [钱华, 章重洋, 郑晓红. 呼吸道传染病气溶胶传染致病机理及预测方法. 科学通报, 2018, 63: 931–939]
- 18 Wessel D, Flügge U I. A method for the quantitative recovery of protein in dilute solution in the presence of detergents and lipids. *Anal Biochem*, 1984, 138: 141–143
- 19 Zhou C Q, Shen Y, Li Z, et al. Transmission and health risk analysis of microbial aerosol in medical institutions (in Chinese). *Chin J Nosocomiol*, 2018, 5: 221–232 [周超群, 沈月, 李真, 等. 医疗机构微生物气溶胶传播及健康风险分析. 中国医院感染学杂志, 2018, 5: 221–232]
- 20 Liu P, Zhang L H, Li D. Dynamic characteristics of human droplet indoor transmission (in Chinese). *Refrig Air-cond*, 2016, 4: 371–376 [刘鹏, 张华玲, 李丹. 人体飞沫室内传播的动力学特性. 制冷与空调, 2016, 4: 371–376]
- 21 Liu Y, Ning Z, Chen Y, et al. Aerodynamic analysis of SARS-CoV-2 in two Wuhan hospitals. *Nature*, 2020, 582: 557–560
- 22 You R, Cui W, Chen C, et al. Measuring the short-term emission rates of particles in the “personal cloud” with different clothes and activity intensities in a sealed chamber. *Aerosol Air Qual Res*, 2012, 13: 911–921
- 23 Lai A C K. Particle deposition indoors: A review. *Indoor Air*, 2002, 12: 211–214
- 24 Thatcher T. Deposition, resuspension, and penetration of particles within a residence. *Atmos Environ*, 1995, 29: 1487–1497
- 25 Zhu N, Zhang D Y, Wang W L, et al. A novel coronavirus from patients with pneumonia in China, 2019. *N Engl J Med*, 2020, 382: 727–733
- 26 Bar-On Y M, Flamholz A, Phillips R, et al. SARS-CoV-2 (COVID-19) by the numbers. *eLife*, 2020, 9: e57309
- 27 Bourouiba L. Turbulent gas clouds and respiratory pathogen emissions: Potential implications for reducing transmission of COVID-19. *JAMA-J Am Med Assoc*, 2020, 323: 1837–1838
- 28 Hui D S, Chow B K, Chu L, et al. Exhaled air dispersion during coughing with and without wearing a surgical or N95 mask. *PLoS One*, 2012, 7: e50845
- 29 Atkinson F S, Foster-Powell K, Brand-Miller J C. International tables of glycemic index and glycemic load values: 2008. *Diabetes Care*, 2008, 31: 2281–2283
- 30 Yang W, Elankumaran S, Marr L C. Concentrations and size distributions of airborne influenza A viruses measured indoors at a health centre, a day-care centre and on aeroplanes. *J R Soc Interface*, 2011, 8: 1176–1184
- 31 Marr L C, Tang J W, Van Mullekom J, et al. Mechanistic insights into the effect of humidity on airborne influenza virus survival, transmission and incidence. *J R Soc Interface*, 2019, 16: 20180298
- 32 Liu L, Li Y, Nielsen P V, et al. Short-range airborne transmission of expiratory droplets between two people. *Indoor Air*, 2017, 27: 452–462
- 33 Ji Y, Qian H, Ye J, et al. The impact of ambient humidity on the evaporation and dispersion of exhaled breathing droplets: A numerical investigation. *J Aerosol Sci*, 2018, 115: 164–172
- 34 Teleanu M D, Boudville I C, Heng B H, et al. Factors associated with transmission of severe acute respiratory syndrome among health-care workers in Singapore. *Epidemiol Infect*, 2004, 132: 797–803
- 35 Embil J, Dyck B, McLeod J, et al. Cleaning house: How to prevent office infections. *Can J CME*, 2003, 15: 127–136
- 36 Chen C, Zhao B. Some questions on dispersion of human exhaled droplets in ventilation room: Answers from numerical investigation. *Indoor Air*, 2010, 20: 95–111
- 37 Tang J W, Liebner T J, Craven B A, et al. A schlieren optical study of the human cough with and without wearing masks for aerosol infection control. *J R Soc Interface*, 2009, 6(Suppl): S727–S736

Summary for “人呼出飞沫和飞沫核的运动传播规律”

Movement and transmission of human exhaled droplets/droplet nuclei

Hui Dai¹ & Bin Zhao^{1,2*}¹ Department of Building Science, School of Architecture, Tsinghua University, Beijing 100084, China;² Beijing Key Laboratory of Indoor Air Quality Evaluation and Control, Tsinghua University, Beijing 100084, China* Corresponding author, E-mail: binzhao@tsinghua.edu.cn

Most respiratory infectious diseases may be spread by human exhaled droplets and droplet nuclei. The once-in-a-century coronavirus disease 2019 (COVID-19) pandemic has shown that the airborne transmission of severe acute respiratory syndrome coronavirus 2 (SARS-CoV-2) cannot be ignored. Understanding the movement and transmission of human exhaled droplets and droplet nuclei is of great significance for exploring the basic transmission mechanisms of SARS-CoV-2 and for developing effective engineering control strategies for infectious diseases. In this paper, we summarize research results on transmission of human exhaled droplets and droplet nuclei, in combination with real-time studies focused on COVID-19. First, droplets exhaled by normal speech, coughing and sneezing range from 10–50, 73–100, and 80–340 μm in size, respectively, with small-sized droplets outnumbering large ones. Second, particle size has a significant impact on the movement and spread of droplets. Large droplets rapidly settle in the air and travel a short horizontal distance, with a small-scale infection range of the source, which is the premise of droplet transmission. Small droplets completely evaporate into droplet nuclei before settling to the ground and then travel a long distance with the airflow, which is the premise of airborne transmission (aerosol transmission). However, what constitutes “large droplets”, and how far can they move on earth? Answering these two questions is crucial for establishing the theory for the mechanism of droplet transmission. Therefore, we clarify the definition of the “critical size” and “critical distance” to distinguish between droplet transmission and airborne transmission, which vary with the composition and size of droplets, environmental factors (temperature, humidity, air velocity, etc.), and the form of air distribution. Different research results may have different critical size or critical distance. Subsequently, we discuss droplet evaporation and its influencing factors. The evaporation of droplets is significantly decided by the relative humidity (RH) of the ambient air and the initial size of the droplets. Droplet nuclei, contributing significantly to airborne transmission, usually have a particle size of less than 1 μm . Their diameters are about 0.25 to 0.5 times that of the initial droplets. Additionally, the droplets within critical size could completely evaporate into droplet nuclei in a low-RH air environment, or settle within a critical distance to cause droplet transmission in a high-RH environment. As a result, we consider the critical size of droplets to be about 30–110 μm , and the critical distance for droplet transmission and airborne transmission to be about 2.5 m. Finally, we collect some latest research on COVID-19. The size of the droplet nuclei containing SARS-CoV-2 is mainly distributed in two ranges: 0.25–0.5 and 0.5–1 μm . Taking the high momentum turbulence effect of sneezing or coughing into account, the virus can be transmitted up to 7–8 m away. These results are expected to be applied for understanding the opportunistic airborne transmission of COVID-19 and for the disease control and prevention in engineering and public places.

aerosol, airborne transmission, droplet evaporation, transmission distance, COVID-19doi: [10.1360/TB-2020-0643](https://doi.org/10.1360/TB-2020-0643)