

## Views &amp; Comments

## 新冠病毒冷链物流全球传播挑战与多级绿色屏障疫情防控对策

何旭<sup>a</sup>, 刘新旺<sup>a</sup>, 李攀<sup>b</sup>, 王盼盼<sup>a</sup>, 程海军<sup>a</sup>, 李文倩<sup>a</sup>, 李博达<sup>a</sup>, 刘婷<sup>a</sup>, 马军<sup>a</sup><sup>a</sup> State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China<sup>b</sup> State Key Laboratory of Control and Resource Reuse, College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China

## 1. 新冠病毒以冷链货物为媒介的“物传人”传播方式

由 SARS-CoV-2 病毒引发的新型冠状病毒肺炎 (COVID-19) 已在全球范围大流行近两年时间, 截至 2021 年 9 月 22 日, 全球累计发病超过 2.29 亿例、死亡病例超过 475 万例[1]。目前世界各国的防控形势可大体分为两个阶段, 即欧美、印度地区仍在经历的病毒大流行阶段和中国等国家所处的疫情常态化防控阶段。

近期已有报道指出, 2019 年 3–10 月的意大利、美国、法国和西班牙的环境样品和血液样品中已经检测出新冠阳性结果[2], 说明病毒在全球范围内的起源和传播是一个极其复杂的问题, 得到了世界广泛关注。根据现有研究结果, 经呼吸道飞沫和密切接触的“人传人”传播是新冠病毒的主要传播途径[3]。2020 年, 中国境内陆续发生了多起由国际冷链物流从业人员通过接触被污染的冷链货物而被感染的事件[4], 中国-世界卫生组织新冠病毒溯源研究报告也将通过冷链食品运输引入人群列为“可能”的疫情起源与传播途径[5]。这些事件均表明接触被病毒污染的物品也可造成感染。由于低温环境有利于病毒的长期存活[6], 因此通过接触被污染冷链货物导致感染的“物传人”方式可能在新冠疫情的暴发和传播过程中起到关键作用。与近百年来发生的其他疫情相比, 新冠疫情是第一次将病毒通过冷链货物传播列为关键传播途径并引起了全球的密

切关注。

作为新冠病毒传播媒介的冷链物流是指商品 (食品、药物、水果、花卉等) 在生产、仓储、运输和销售的各个环节中始终处于规定的最佳低温环境, 从而确保商品质量、减少商品损耗的一项系统工程。根据统计数据, 2018 年全球冷链物流市场规模已达 1670 亿美元以上, 在各类冷链商品中, 食品冷链物流的体量最大, 占整个冷链物流 75% 以上的市场份额[7]。以中国为例, 冷链物流需求总量由 2014 年的 0.92 亿吨增长到 2019 年的 2.65 亿吨, 总额超过 3820 亿元[8–9]。基于全球人口的持续增长, 可以推测全球冷链物流需求总量和规模将同样保持快速增长, 特别是在发展中国家。

但是, 当快速增长的冷链货物成为病毒“物传人”传播途径的媒介时, 却不可能通过长期中断全球冷链物流的方式来进行疫情防控。因此, 如何有效地阻断病毒“物传人”传播途径已成为全球面临的新挑战。在这种情况下, 对冷链货物的高效安全绿色消毒是目前最为可行的选择方案。然而, 在实际的冷链消毒作业过程中, 发现存在如下几个关键问题:

(1) 在进口和出口国海关对冷链货物进行病毒检测和消毒对保证跨国冷链物流的安全起到至关重要的作用。但由于检测工作量巨大, 目前各国海关对于冷链货物的检测主要采用抽检的方式, 难以保证对携带新冠病毒货物的完全检出。

(2) 常规人工喷洒消毒剂的作业方式存在着人工工作量巨大、消杀时间过长的实际问题。

(3) 次氯酸钠、过氧乙酸、二氧化氯等常见消毒剂在喷洒之后存在结冰问题，导致病菌灭杀效力大幅下降。并且，由于冷库内货物的堆积摆放，运用紫外线、电离辐射等辐射消毒方法又存在消毒死角问题，因此冷链物流消毒比常规消毒作业更加困难。

(4) 目前普遍使用的次氯酸钠、二氧化氯等氯系消毒剂存在产生有害消毒副产物问题，对人体健康构成潜在风险。

(5) 在实际消毒过程中，为保证消毒效果，常出现消毒剂过量使用的情况。过量的消毒剂通过污水排放进入环境中后，将提升环境中细菌的耐药性，导致强耐药性的超级细菌的产生，可能引发新疫情的出现，成为人类健康的新挑战[10]。

## 2. 冷链货物的多级屏障消毒体系

为解决这些问题，我们提出构建涵盖冷链商品全生命周期的多级绿色屏障体系。如图1所示，该体系是通过冷链商品全生命周期的五个关键节点采取有针对性的消毒措施和防护手段，达到高效杀灭病毒、切断病毒冷链传播途径的目标。

### 2.1. 冷链加工及国际物流

近来在德国、英国等国家工厂内频繁发生的聚集性疫情[11]，表明对冷链加工环节进行病毒防控和消毒作业的重要性和紧迫性。在冷链加工过程中，操作工人与产品的频繁接触可能大幅提升病毒“物传人”途径的感染概率。同时，加工车间的低温封闭环境也利于发生操作工人间的

“人传人”感染。因此对产品原料进行有效的消毒、控制厂房内同时工作的人数、加强个人防护装备是防止在此环节发生聚集性疫情的有效方法。在冷链商品的国际贸易中，应特别关注在进出口国海关对货物的有效消毒。鉴于海关通关货物总量巨大、工作人员数量有限的实际情况，建议采用臭氧消毒等自动化程度高的消毒技术，对所有货物进行预防性消毒，有效减轻海关一线工作人员的消毒工作负荷。

### 2.2. 贮藏冷库

已有研究证实，在4℃（冷藏标准）及-20℃（冷冻标准）的条件下放置21天后，沾染到鸡肉、三文鱼、猪肉里的SARS-CoV-2传染性没有下降，证明冷库的低温环境有利于病毒的长期存活[12]。近期发生的天津国际物流冷库装卸工人感染新冠病例和在大连、天津等地的国际港口冷库货物外包装、冷库门把手上发现核酸检测阳性样本的案例，均表明在冷库贮藏环节存在“物传人”的感染风险，因此对冷库墙体、地面及冷库内货物的消毒是防止此环节发生病毒感染的主要手段。如前所述，冷库的低温环境将导致常规液态消毒剂的消毒效率大幅下降，而冷库内大量货物的堆积摆放又使紫外线、电离辐射等消毒方式存在消毒死角问题。因此，针对冷库低温、密闭、大量货物堆积摆放的特点，开发适用于冷库环境的高效消毒技术是目前亟待解决的关键问题。

### 2.3. 冷链运输

冷链运输包括长距离的冷藏船和冷藏集装箱运输、陆上铁路冷藏车厢和冷藏汽车运输以及高成本的航空运输。与贮藏冷库相似，对用于冷链运输的集装箱、冷藏室等的消毒作业同样在低温密闭环境中进行。同时，与冷库相比，集装箱及冷藏室具有容积相对较小、可移动的特点。

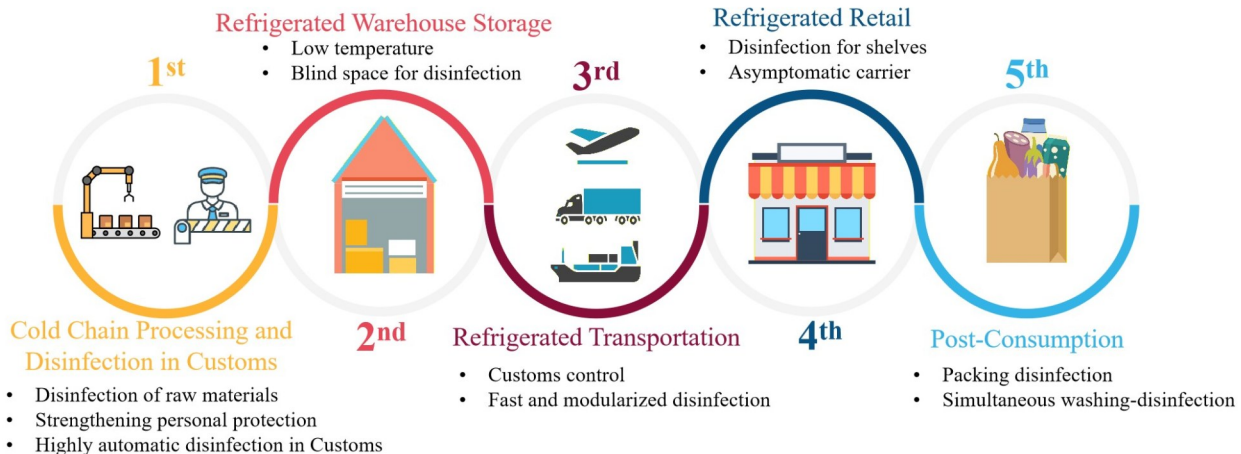


图1. 冷链货物的多级屏障消毒体系。

可充分利用这些特点, 开发针对冷链运输环节的移动式、模块化消毒装备, 实现对多个集装箱、冷藏室等单元的同步消毒, 提高消毒速度。

#### 2.4. 销售终端

销售终端指冷链货物进入批发零售环节的冷冻储藏和销售。其中, 零售终端的低温存储冷库的消毒与前述贮藏冷库的消毒策略相同。需要特别注意的是, 在销售环节, 消费者与冷链货物会发生直接接触, 存在病毒的“物传人”传播风险。因此, 应每天对冷链商品销售柜台实施规律性的多次消毒。同时, 也可能存在无症状感染者通过飞沫或接触传播, 将病毒传播至冷链货物的情况, 因此也建议采用臭氧、紫外照射等方式对货架上的冷链商品进行高频率或持续预防性消毒。

#### 2.5. 后销售阶段

在上述冷链物流四个关键环节基础上, 在冷链商品销售后的居家消毒是多级屏障消毒体系的最后一个环节。对于商品外包装, 可以采用75%酒精或家用紫外消毒装置进行消毒。对于蔬菜、水果、肉类等需要清洗的冷链食品, 可以使用微气泡臭氧水新技术对食品进行同步清洗和消毒。同时, 生活用水的居家消毒和污水厂的消毒工艺对于病毒防控也起到关键作用。由于水中氨氮会显著降低氯消毒效果, 建议采用不受本底氨氮浓度影响、消毒效率更高的臭氧及相关高级氧化技术进行消毒。

综上所述, 通过构建针对冷链物流系统中五个关键环节的多级屏障消毒体系, 能够保证冷链货物在使用之前已完成多次消毒, 有效切断病毒以冷链物流为媒介的“物传人”传播途径。

### 3. 针对冷链物流的绿色消毒技术

与常规消毒作业不同, 对冷链货物和装备的消毒是在低温下进行的特种消毒作业。目前针对新型冠状病毒的消杀, 主要是使用含氯消毒剂或75%酒精等传统液态消毒剂, 但这些方法通常适用于常温条件。由于冷链运输及贮藏温度一般在-20℃左右, 次氯酸钠、过氧乙酸、二氧化氯等常见消毒剂在喷洒之后容易结冰, 病菌消杀效率将大幅度下降。为此, 中国疾病预防控制中心于2021年2月公开发布了两种基于三氯异氰尿酸钠的氯系低温消毒剂配方, 分别适用于-18℃和-40℃低温环境下的消毒[13]。

在应用液态消毒剂对冷库、集装箱等进行常规喷洒消毒作业时, 通常情况下几个工作人员同时作业一天的消杀

货物量约为几十吨, 而一个大型冷库的总容量可达几千吨甚至上万吨, 总消杀时间可能需要数月以上, 给疫情防控带来很大挑战。并且, 由于冷链货物在冷库和集装箱内的堆积摆放, 液态消毒剂的喷洒作业和紫外消毒、伽马射线消毒等辐射消毒方式均存在消毒死角问题, 因此, 在这一方面, 以臭氧为代表的气态消毒剂具有消毒装备自动化程度高、无消毒死角、低温消毒效果好的优势。在大连、绥芬河等地的冷链物流实际消毒作业中, 臭氧消毒技术展现了良好的消毒效果。

最后, 在疫情进入常态化防控阶段的大背景下, 冷链货物的消毒也将进入常态化阶段。此时, 需要特别考虑消毒过程可能造成的二次污染问题, 包括消毒剂对饮用水源的污染风险、消毒副产物的积累和对环境的持久性污染效应等。现行公布的冷链消毒剂主要为含氯、碘或季铵盐消毒剂, 它们在实际消毒过程中会产生亚氯酸盐、氯酸盐、碘乙酸、亚硝胺等对人体有害的消毒副产物[14], 大量使用将存在很大的安全风险。同时, 附着在商品外包装上的残留消毒剂在焚烧处理过程中有可能产生二噁英等空气污染物, 造成环境污染[15]。并且, 三氯异氰尿酸钠、二氧化氯等具有易燃易爆性, 药剂需要妥善保存或现场制备。与上述消毒剂相比, 以臭氧消毒、紫外消毒等为代表的绿色消毒技术具备有害消毒副产物的产量极低、环境残留量低、安全性较高等明显优势。因此, 在冷链货物的常态化消毒阶段, 应推广使用绿色消毒技术, 并在进一步提高此类技术的消毒效率方面继续开展深入研究。在此基础上, 应编写相应的技术指南和规范, 促进绿色消毒技术的标准化发展。

### 致谢

本研究得到国家重点研发计划(2019YFD1100104-03-01)、国家自然科学基金(52000048)、教育部春晖计划合作科研项目(HLJ2019006)、哈尔滨工业大学交叉科学基金(IR2021017)、黑龙江省臭氧应用技术与设备开发重点实验室自主课题(OZO202104)支持。

### References

- [1] WHO Coronavirus (COVID-19) Dashboard [Internet]. Geneva: World Health Organization; [cited 2021 Jul 24]. Available from: <https://covid19.who.int/>.
- [2] Yue H, Yang M. [Many countries release new findings in the area of COVID-19] [Internet]. Beijing: People's Daily Online; 2021 Jan 19 [cited 2021 May 11]. Available online: <http://world.people.com.cn/n1/2021/0119/c1002-32003681.html>.
- [3] Liu W, Guan WJ, Zhong NS. Strategies and Advances in Combating COVID-

- 19 in China. *Engineering* 2021;6(10):1076–84.
- [4] Liu P, Yang M, Zhao X, Guo Y, Wang L, Zhang J, et al. Cold-chain transportation in the frozen food industry may have caused a recurrence of COVID-19 cases in destination: successful isolation of SARS-CoV-2 virus from the imported frozen cod package surface. *Biosaf Health* 2020;2(4): 199–201.
- [5] HeadquartersWHO. WHO-convened global study of origins of SARS-CoV-2: China part. Report. Geneva: World Health Organization; 2021 Mar 30.
- [6] Holtmann M, Mike J, Shah A, Holtmann G. Low ambient temperatures are associated with more rapid spread of COVID-19 in the early phase of the endemic. *Environ Res* 2020;186:109625.
- [7] Grand View Research. Cold chain market size, share & trends analysis report by type (transportation, componentsmonitoring, storage), packagingby, equipmentby, applicationby, regionby, and forecastssegment, 2019–2025. Report. 2019 Mar.
- [8] Cui Z. Review of the cold chain logistics in 2019 and outlook for 2020. *Modern logistics* 2020;25(Suppl 2):14–5. Chinese.
- [9] Yuan Xue-guo, Zou Ping, Zhu Jun, Wu Di. Development trend, problems and countermeasures for cold chain logistics industry in China. *Journal of Agricultural Science and Technology* 2015;17(1):7–14. Chinese.
- [10] Lu J, Guo J. Disinfection spreads antimicrobial resistance. *Science* 2021; 371 (6528):474.
- [11] Middleton J, Reintjes R, Lopes H. Meat plants—a new front line in the covid-19 pandemic. *BMJ* 2020;370:m2716.
- [12] Fisher D, Reilly A, Zheng AKE, Cook AR, Anderson DE. Seeding of outbreaks of COVID-19 by contaminated fresh and frozen food. 2020. *BioRxiv*; 2020.08.17.255166.
- [13] Sun H. The Chinese Center for Disease Control and Prevention successfully developed two formulations of chlorine-containing disinfectants for low-temperature environment [Internet]. Beijing: Chinese Center for Disease Control and Prevention; 2021 Feb 7 [cited 2021 May 11]. Available from: [http://www.niehs.cn/gzdt/202102/t20210207\\_224134.html](http://www.niehs.cn/gzdt/202102/t20210207_224134.html). Chinese.
- [14] Benitez JS, Rodríguez CM, Casas AF. Disinfection byproducts (DBPs) in drinking water supply systems: a systematic review. *Phys Chem Earth* 2021; 123:102987.
- [15] Lee WJ, Shih SI, Chang CY, Lai YC, Wang LC, Chang-Chien GP. Thermal treatment of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans from contaminated soils. *J Hazard Mater* 2008;160(1):220–7.