

环氧乙烷
ethylene oxide

Toxics-Free
Corps

无毒先锋

第11期

DETOXIFICATION FILE

解毒档案

—— 顾此失彼：
环氧乙烷灭菌剂的健康危害

环氧乙烷 (ethylene oxide) 是一种用途广泛的重要化工产品，主要作为生产乙二醇和其它产品的中间体，还直接以气体形式用于各种不耐热材料的熏蒸和灭菌，如农产品、医疗产品和医院设备¹。环氧乙烷对微生物的杀灭能力强、杀菌谱广、穿透力强，可有效杀灭各种微生物；且对物品无损坏，可适用于多种材料的灭菌，包括棉毛织品及塑料橡胶制品等一些怕热怕湿物品²。

然而，环氧乙烷已被证明具有各种急性和慢性毒性，世界卫生组织国际癌症研究机构已将它列入1类致癌物清单³。因此，如果操作不当，环氧乙烷可导致严重的健康风险。

现实中，操作消毒设施的工作人员可能会因为环氧乙烷泄露到工作环境或因接触消毒后未经充分通风的医疗用品，而造成暴露；如果消毒后的医疗器械和用品上残留有过量的环氧乙烷，也会对使用医疗器械的医护人员及患者造成暴露；另外，未进行合理处理的含环氧乙烷的消毒设施尾气排入大气后会致更广范围的环境污染。

为了避免环氧乙烷带来的健康损害，各国均制定了相应法规对环氧乙烷作为灭菌剂的使用流程和环境浓度进行严格的要求。与此同时，各国医疗机构也在探寻和使用更低毒或无毒的替代灭菌方式。

一、环境健康危害

环氧乙烷的化学分子式为 C_2H_4O ，结构式如图1。在常温下为无色带有醚刺激性气味的液体，环氧乙烷气体的蒸汽压高，30℃ 时可达141kPa，这种高蒸汽压使得环氧乙烷在进行熏蒸消毒时穿透力较强⁴。环氧乙烷在4℃时冷凝为无色透明液体，易溶于水和有机溶剂，最低燃烧浓度为3%；其化学性质非常活泼，遇高温、明火有引起爆炸的危险⁵。急性环氧乙烷暴露被发现可导致头痛、恶心、呼吸困难等症状；慢性环氧乙烷暴露被发现与癌症、生殖影响、突变变化、神经毒性和致敏等健康危害有关⁶。

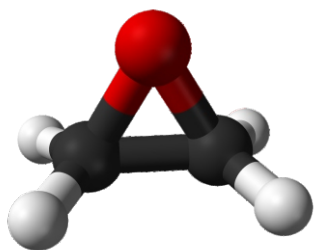


图1 环氧乙烷分子结构式及结构图

作为一种烷化剂，环氧乙烷可以直接与亲核大分子（DNA、RNA或蛋白质）反应，能致体细胞突变且在生殖细胞中可引起遗传损伤，包括染色体畸变和基因突变，产生遗传毒性⁷。

已有多项研究显示环氧乙烷暴露可导致神经系统损害：一项研究发现接触环氧乙烷平均6.13年的22名医院消毒人员，发生感觉能力受损和功能紊乱；另一项研究发现96名男性接触者平均工龄11.2年，车间环

氧乙烷平均浓度8.00mg/m³，出现肌无力及周围神经损害较明显⁸。

上个世纪，曾有研究人员对芬兰医院从事消毒工作的女性自然流产情况进行了调查，结果显示怀孕期间从事消毒工作的妇女自然流产率为15.1%，怀孕期间未从事消毒工作的消毒员工的自然流产率为4.6%，而这些自然流产率的增加与环氧乙烷暴露有关⁹。

关于环氧乙烷的致癌性，美国国家职业安全与健康研究所（NIOSH）曾开展过两项研究，考察环氧乙烷暴露的健康影响。研究覆盖了来自美国各地的18,235名男性和女性，他们在工作时会暴露于环氧乙烷，并大多数使用环氧乙烷对医疗用品进行消毒或处理香料。这也是有史以来美国对环氧乙烷暴露和疾病风险进行的最大规模的研究。结果显示，与普通美国人群相比，被研究人群的总体癌症或其他疾病风险并未升高。然而，对于那些暴露水平非常高的工人（同时考虑暴露水平和工作年限），有证据表明，男性患血癌和女性患乳腺癌的风险升高¹⁰。

环氧乙烷对环境危害主要体现在对大气的污染。环氧乙烷属于挥发性有机物，可与氮氧化物发生光化学反应，形成气溶胶的二次污染，这也是中国雾霾中的组成部分；雾霾中吸附的有毒有机物可诱发多种呼吸道、心血管疾病，其中环氧乙烷就名列其中；因为它的高毒性以及极强的化学活性，可与其它空气中的化学成分反应，极有可能生成毒性更大、危害更为严重的复合物¹¹。

二、法规和标准

环氧乙烷的健康危害已受到普遍重视，我国已制定了相应法规和标准对环氧乙烷作为灭菌剂的使用流程、灭菌物品残留量 and 环境浓度进行严格的要求。

1.使用流程标准

国家标准《医疗保健产品灭菌 环氧乙烷GB18279》中对使用环氧乙烷灭菌的操作有一系列具体的规定。在对过程和设备特征的要求中规定，环氧乙烷灭菌过程应包括预处理、灭菌周期及解析，其中灭菌周期应包括去除空气、处理、环氧乙烷注入、在暴露时间内规定条件的保持、去除环氧乙烷、换气以及加入空气/惰性气体。该标准适用于医疗器械制造商和医疗保健机构。2002年版《消毒技术规范》规定，使用环氧乙烷灭菌时可采用100%纯环氧乙烷或环氧乙烷和二氧化碳混合气体，禁止使用氟利昂。

以某医院使用的美国3M公司生产的环氧乙烷灭菌柜为例，其对操作流程的要求包括灭菌前清洗、包装，和在灭菌柜中的摆放位置、装载量等。根据物品种类，正确设置灭菌温度和通风时间，例如聚乙烯材料物品解析60℃时8h、50℃时12h。另外，还需通过工艺监测、化学监测和生物监测方法监测灭菌质量¹²。

2.残留量标准

关于环氧乙烷在灭菌物品中残留量的允许值，2017年1月1日实施的推荐性国家标准《医疗器械生物学评价第7部分：环氧乙烷灭菌残留量GB/T 16886.7-2015/ISO 10993-7:2008》规定了经环氧乙烷灭菌的单件医疗器械上环氧乙烷（EO）及2-氯乙醇（ECH）残留物的允许限量，并根据不同的类型的医疗器械，以及短期、长期和持久接触三种接触时间长度进行了详细分类，见表1。（环氧乙烷容易与物品上的氯离子反应生成2-氯乙醇，2-氯乙醇是一种具有急性毒性、可经皮肤吸收的易燃性液体；2-氯乙醇有轻微的致突变性，具有产生胎儿毒性和致畸性改变的潜能，并可对肺、肾、中枢神经系统和心血管系统造成损伤¹³。）

表1: EO和ECH允许限量汇总（单件器械限量）

器械分类	EO	ECH
短期接触类*（≤24h）	4mg	9mg
长期接触类（>24h≤30d）	60mg/30d	60mg/30d
持久接触类（>30d）	一生2.5g	一生10g
可耐受接触限量**（TCL）	10μg/cm ² 或极轻微刺激	5mg/cm ² 或极轻微刺激
人工晶状体	每个晶状体0.5μg/d，每个晶状体1.25μg	4×EO建议限量
血细胞分离器（单采）	10mg	22mg
血液氧合器	60mg	45mg
心肺旁路装置	20mg	9mg
血液净化装置（血液透析器）	4.6mg	4.6mg
接触完好皮肤的手术单	10μg/cm ² 或极轻微刺激	5μg/cm ² 或极轻微刺激

*三种接触类型分别为：

短期接触：在24h以内一次、多次或重复使用或接触的器械；

长期接触：在24h以上30d以内一次、多次或重复长期使用或接触的器械；

持久接触：超过30d以上一次、多次或重复长期使用或接触的器械。

** 可耐受接触限量是针对表面接触器械和植入物。

该标准还提到，若同时使用多个含残留物的器械，宜考虑按比例降低单个器械的残留限量；或者当器械只在接触期的部分时间使用时，宜考虑按比例提高限量。同时，标准还在引言中援引ISO11135-1:2007在引言中所述，在确定环氧乙烷对医疗器械灭菌的适宜性时，

重要的是确保在产品正常使用中环氧乙烷、2-氯乙醇和乙二醇(EG)残留水平对患者产生最小的风险；因此，在产品的设计和开发过程中考虑使用替代材料和灭菌过程是非常重要的。

就具体医用品而言，国家标准《一次性使用输液器 重力输液式GB8368-2018》(2018年3月15日发布，2021年4月1日实施，代替GB8368-2005)规定，若

采用环氧乙烷灭菌，每套输液器的环氧乙烷残留量应不大于0.5mg。另外，国家标准《一次性使用卫生用品卫生标准GB15979-2002》规定，任何经环氧乙烷消毒的卫生用品出厂时，其残留量必须 $\leq 250\mu\text{g/g}$ 。医药行业标准《医用外科口罩YY0469-2011》和《一次性使用医用口罩YY/T0969-2013》以及国家标准《医用防护口罩技术要求GB19083-2010》均规定经环氧乙烷灭菌的口罩，其环氧乙烷残留量应不超过 $10\mu\text{g/g}$ 。

3. 环境浓度标准

2002年版《消毒技术规范》规定在每日8h工作中，环氧乙烷浓度应不超过 1.82mg/m^3 (1ppm)，15min工作中暴露浓度不超过 9.1mg/m^3 (5.0ppm)。在国家职业卫生标准《工作场所有害因素职业接触限值GBZ2.1-2007》中，以时间为权数规定的8小时工作日、40小时工作周的工作场所环氧乙烷容许浓度为 2mg/m^3 (约为1ppm)。对于工



作环境浓度，大部分发达国家规定在环氧乙烷环境下工作暴露极限需小于1ppm，德国甚至将暴露极限定为0.1ppm¹⁴。美国国家职业安全与健康研究所基于环氧乙烷在动物中具有致突变性和致癌性，以及影响生殖健康等结论，建议工人的暴露限值为5ppm浓度下每工作日不超过10分钟，工人的8小时时间加权平均浓度限制在0.1ppm以下¹⁵。

此外，环氧乙烷也被收录在各国的大气环境污染控制有毒有害挥发性有机物名录中。德国空气质量控制技术规范（TA-Luft）标准（2002年）为0.5mg/m³，中国尚未有针对消毒行业废气排放的标准，但根据中国《石油化学工业污染物排放标准GB31571-2015》中的规定，废气中环氧乙烷的排放限值为0.5mg/m³¹⁶。

三、使用现状及存在的问题

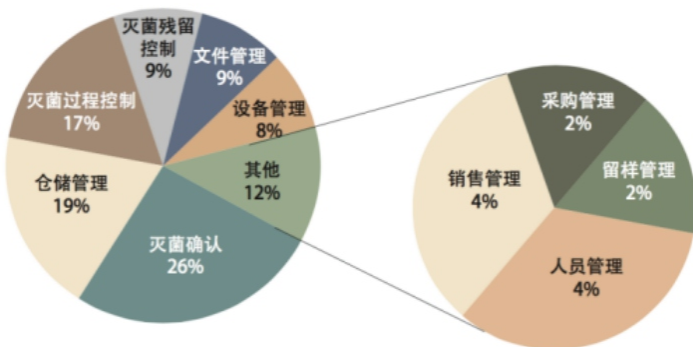


图2：环氧乙烷灭菌控制共性缺陷数量及占比分布图

使用环氧乙烷对医疗用品进行消毒涉及生产企业在产品出厂之前进行的消毒，以及医疗机构对手术器械等复用医疗用品的消毒。与其相关联的环境健康风险主要体现在：

- 1) 消毒过程中可能发生的环氧乙烷泄露导致的职业健康损伤；
- 2) 未经充分解析的消毒物品上残留的环氧乙烷对存放环境的污染，及对使用者造成的健康危害；
- 3) 未经妥善处理含环氧乙烷的消毒设施尾气排放导致的环境及健康影响。

目前大多数无菌医疗器械生产企业普遍采用环氧乙烷灭菌，唐剑¹⁷通过总结其参与无菌医疗器械GMP（良好操作规范）现场检查的工作经验，梳理了医疗器械生产企业环氧乙烷灭菌控制常见的10大方面的共性缺陷，其中如图²¹⁸所示，灭菌确认、仓储管理、灭菌过

程控制3方面的共性缺陷数量最多。具体问题包括未设置环氧乙烷解析间、环氧乙烷加药间未安装泄露监测报警装置、残留量检验未按检验规程要求进行等等。

在医院的医疗器材灭菌中用的环氧乙烷一般采用的是独立包装一次性使用的密闭铝罐，一般不会泄露，只是在使用过程中，会有少量环氧乙烷弥散在周围的空气环境中¹⁹。一项针对某医院环氧乙烷灭菌器运行过程产生的职业病危害检测和分析发现，灭菌时空气中环氧乙烷浓度及作业人员取件接触的环氧乙烷浓度均符合职业接触限值要求，但作业人员在处理灭菌

包时接触到的残留环氧乙烷浓度超标²⁰。

环氧乙烷气体极易吸附于塑料、橡胶及其他合成材料的分子之间，逸散较难，不易清除²¹。有从事医疗机构消毒工作的人员在其发表的文章中列举了医疗器械环氧乙烷残留问题，包括一些企业将灭菌器械不解析灭菌后立

职业危害告知卡	
环氧乙烷	健康危害
	其蒸气能与空气形成范围广阔的爆炸性混合物。遇热源和明火有燃烧爆炸的危险。若遇高热可发生剧烈分解，引起容器破裂或爆炸事故。其蒸气比空气重，能在较低处扩散到相当远的地方，遇火源会着火回燃。
	理化特性
	该物品易燃易爆，有毒，为致癌物，具刺激性，具致敏性。
应急处理	
	如有泄漏，立刻切断电源，远离火种、热源，禁止明火。人员迅速撤离污染区，应急处理人员戴自给正压式呼吸器，穿防静电工作服，切断泄漏源。用喷雾状水稀释、溶解。
防护措施	
 当心中毒  当心爆炸	    
对人体有害 请注意防护 急救电话：120 火警电话：119	

图3：环氧乙烷工作环境的职业危害告知卡

即或2-5天后送到医院，造成医院库房解析出较高环氧乙烷，并造成库房人员出现头昏、嗜睡；以及环氧乙烷灭菌后的导尿管未经解析处理，残留量较大，造成患者尿道灼伤等²²。该作者还提到，国内一些医院使用环氧乙烷灭菌医疗器械，没有制定环氧乙烷残留量的监测标准，也没有监测和控制器械上的环氧乙烷残留量。

调查显示，我国应用于医用消毒行业的环氧乙烷，年使用量约为30000吨。中国医疗灭菌行业大约有企业500家，99%以上的企业未对环氧乙烷进行尾气处理，大部分靠自然挥发，或仅配备抽风、换气设施，残余环氧乙烷直接排入大气；而其中对环氧乙烷尾气进行处理的也只是采用水洗收集，处理后尾气也无法达到合规排放²³。关于水洗收集，有案例显示因吸收环氧乙烷废气而产生的工业废水可检出环氧乙烷，且废水的BOD₅和COD浓度严重超过了国家和当地允许的废水排放标准，不能直接向当地的市政污水管网排放²⁴。

四、替代方案

避免环氧乙烷损害健康的最直接的办法是选用更安全的替代灭菌措施。国内外都有医院已经不再使用环氧乙烷灭菌，但医疗用品生产企业的使用还很普遍，也是淘汰的难点。以下简单介绍几种替代灭菌措施。

1. 蒸汽灭菌

高温高压蒸汽灭菌法是另一种十分常见的灭菌方法，同环氧乙烷灭菌一样被广泛应用。相比较于环氧乙烷，高温高压蒸汽无化学毒害作用，仅可能发生烫伤、物理爆炸等问题。对于蒸汽灭菌的操作流程，也有一系列具体的要求，要求主要用于防止水迅速沸腾产生的危害。高温高压蒸汽灭菌一个周期所需时间短，仅需要约半小时左右。但是高温高压蒸汽灭菌对需灭菌的物品有一定的要求，需灭菌的物品需满足耐高温、高压以及不怕潮湿的特点，例如纱布、敷料、手术器械、玻璃器材等。

2. 过氧化氢

过氧化氢气体也可用于医疗用品灭菌，而且过氧化氢气体灭菌相较环氧乙烷灭菌有一定的优点，例如灭菌后分解产物为水和氧气，无有毒副产品；也因此灭菌后的医疗器械无需通风，灭菌循环快捷，可提升医疗器械的周转速度。过氧化氢气体灭菌可在室温下进行，相比于高温高压蒸汽灭菌，操作简单不易发生事故。但过氧化氢可通过皮肤及眼睛接触、吸入、吞服等途径造成健康损伤。急性健康影响包括灼伤皮肤和眼睛，刺激呼吸系统；较高的暴露可能会导致肺水肿，接触过氧化氢还会导致头痛、恶心等症状；长期健康影响可能涉及引起突变²⁵。而且过氧化氢气体灭菌对器械材质具有严格的限制。纤维类纸、纱布、棉布、粉剂、油剂、尼龙材料、布垫、液体吸收性材料等均属不兼容材料；且带盲端、半盲端管腔或管腔过长过细的器械、含有铜材质管腔的器械均无法进行过氧化氢低温等离子灭菌²⁶。

3. 辐照灭菌

紫外线辐照杀菌也是一种常用的消毒灭菌手段，特定波长的紫外线对生物的DNA、RNA有极强的破坏作用，持续照射可以起到杀菌的作用。使用辐照杀菌相比于使用环氧乙烷灭菌有一定的优势，例如关闭辐射源后被消毒物品没有任何有害物质残留，且在进行灭菌时对设备的密封性、复杂性等要求更低，操作简单并且节省能耗。辐照杀菌相比蒸汽灭菌也有其优势，使用辐照杀菌可在低温下进行，对于不耐高温的物品也可使用。但是辐照杀菌也有

分液体对紫外线有吸收作用，在对含有液体的材料进行杀菌时效果将大打折扣。如对生物活性样品进行辐照灭菌，则有可能破坏样品原有的生化特性，影响样品的使用，也不宜使用辐照灭菌。

4. 臭氧灭菌

臭氧是一种强氧化剂，它可以直接与细菌、病毒作用，破坏DNA、RNA，起到杀菌消毒的作用。有研究指出，臭氧溶解于水中，几乎能够杀死水中一切对人体有害的物质。臭氧灭菌可直接使用臭氧与空气混合，无需任何添加剂，且多余的臭氧在一段时间后还会自动转化成氧气，没有残留或二次污染。相比于辐照灭菌，使用臭氧灭菌时将臭氧气体通入灭菌箱中，气体可以弥漫整个空间而不留任何死角。但臭氧对人体也会产生健康危害，美国国家职业安全与健康研究所针对臭氧给出的立即威胁生命和健康浓度为5ppm，还有文章提到严重急性暴露于浓度约为9ppm的臭氧和其他空气污染物的电焊工出现了肺水肿²⁷。

每种灭菌方法都有其优势和缺点，涉及灭菌效果、与被灭菌物品材料的兼容性和灭菌剂的环境健康危害等因素。环氧乙烷在灭菌效果和兼容性方面可能存在优势，但其环境健康危害也十分显著且不易控制。在瑞典，很多医院已经完全淘汰了环氧乙烷灭菌，对于一些较难灭菌的内窥镜和半介入式超声探头等器械，他们采用了过氧乙酸和过氧化氢进行灭菌。据了解，国内仍有很多医院在使用环氧乙烷灭菌方法，这其中的替代难点，可能在于替代技术不完备或替代产品成本过高，而推动这些问题解决的关键在于对消毒灭菌剂环境健康影响的足够重视。管理部门的政策要求和医疗机构的采购选择，都将对推动行业内对替代技术的研究和探讨以及替代产品价格的走向起到重要的引领作用，而这一努力的目标也正符合医疗卫生部门保护健康的宗旨。

五、结语

感染控制一直是医疗机构工作中的重中之重，稍有疏忽就可能造成严重的感染事件，所以消毒灭菌效果理应是选用消毒剂时最重要的指标；然而，消毒剂本身具有的一些慢性环境健康影响，可能由于其缓慢发生、不那么显而易见而未被像燃烧、爆炸等风险那样得到严格控制。

环氧乙烷灭菌作为一种传统的灭菌手段被广泛使用，在低温灭菌方面有一定优势，但它的职业健康危害以及环境影响尚未能得到足够重视。医疗器械生产企业和医疗机构在使用环氧乙烷进行灭菌时，应严格地制定和执行操作规范，加强对从业人员的专业培训，并做好防范和应急保护。同时，积极开发、利用更安全的替代灭菌手段。

参考资料

1. Yong L C, Schulte P A, Wiencke J K, et al. Hemoglobin adducts and sister chromatid exchanges in hospital workers exposed to ethylene oxide: effects of glutathione S-transferase T1 and M1 genotypes. [J]. Cancer Epidemiology, Biomarkers & Prevention, 2001, 10(5): 539-550.
2. 杨华明, 易滨. 现代医院消毒学[M]. 北京:人民军医出版社, 2013. 170-174.
3. 国家药品监督管理局, 世界卫生组织国际癌症研究机构致癌物清单, 2017年10月30日, <http://www.nmpa.gov.cn/WS04/CL2068/329742.html>
4. 杨华明, 易滨. 现代医院消毒学[M]. 北京: 人民军医出版社, 2013. 170-174.
5. 吴玉梅. 环氧乙烷在医院物品灭菌中的应用[J]. 中国现代药物应用, 2015; 9(4):265—266.
6. The National Institute for Occupational Safety and Health, "Health and Safety Practices Survey of Healthcare Workers", <https://www.cdc.gov/niosh/topics/healthcarehsp/sterilants.html>
7. 王莹, 顾祖维, 张胜年等. 现代职业医学[M]. 北京:人民卫生出版社, 1996:424.
8. 冯丽琪,王淑琴.环氧乙烷的危害及医院消毒工作中的安全防护[J].护理学杂志,2006(24):67-70.
9. Hemminki K, Mutanen P, Saloniemi I, et al. Spontaneous abortions in hospital staff engaged in sterilising instruments with chemical agents [J]. British Medical Journal, 1982, 285: 1461-1463.
10. The National Institute for Occupational Safety and Health, "Worker Health Study Summaries", <https://www.cdc.gov/niosh/pgms/worknotify/ethyleneoxide.html>
11. 刘峰. 医用消毒行业环氧乙烷的危害与治理[J]. 世界环境, 2018; (170):68—69.

12. 吴玉梅. 环氧乙烷在医院物品灭菌中的应用[J]. 中国现代药物应用, 2015; 9(4):265—266.
13. 国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化管理委员会. GB/T 16886.7-2015/ISO 10993-7:2008 《医疗器械生物学评价第7部分: 环氧乙烷灭菌残留量》, 2015.12.10发布, 2017.1.1实施.
14. 刘峰. 医用消毒行业环氧乙烷的危害与治理[J]. 世界环境, 2018; (170):68—69.
15. The National Institute for Occupational Safety and Health, "Ethylene Oxide Sterilizers in Health Care Facilities: Engineering Controls and Work Practices", <https://www.cdc.gov/niosh/docs/89-115/>
16. 刘峰. 医用消毒行业环氧乙烷的危害与治理[J]. 世界环境, 2018; (170):68—69.
17. 唐剑, 姚鹏. 无菌医疗器械生产企业灭菌控制常见缺陷分析及监管要点梳理[J]. 中国食品药品监管, 2019(10): 41-45.
18. 唐剑, 姚鹏. 无菌医疗器械生产企业灭菌控制常见缺陷分析及监管要点梳理[J]. 中国食品药品监管, 2019(10): 41-45.
19. 卫维剑. 浅谈环氧乙烷的危害及安全防护[J]. 化工管理, 2015(15):5—6.
20. 杨焱, 王明, 王琪等. 某医院环氧乙烷灭菌器职业病危害关键控制点分析[J]. 中国卫生工程学, 2017; 16(5): 574, 577.
21. 杨华明, 易滨. 现代医院消毒学[M]. 北京: 人民军医出版社, 2013. 170-174.
22. 王华生. 医疗器械环氧乙烷残留限量与控制[J]. 中国医疗器械信息, 2008; 14(9): 8-9.
23. 刘峰. 医用消毒行业环氧乙烷的危害与治理[J]. 世界环境, 2018; (170):68—69.
24. 周吉磊. 评估环氧乙烷灭菌装置的环境和职业健康风险[J]. 能源与环境, 2019(6): 73-74, 77.
25. New Jersey Department of Health, Hazardous Substance Fact Sheet-Hydrogen Peroxide, <https://nj.gov/health/eoh/rtkweb/documents/fs/1015.pdf>
26. 吴玉蓉. 过氧化氢低温等离子灭菌的优缺点及应对策略[J]. 中西医结合护理(中英文), 2015, 1(03): 40-42.
27. The National Institute for Occupational Safety and Health, Ozone, <https://www.cdc.gov/niosh/idlh/10028156.html>



无毒先锋

- 本刊是“深圳市零废弃环保公益事业发展中心”实施的“化学品管理民间网络与能力建设”项目的一部分，该项目是由联合国开发计划署负责管理的全球环境基金小额赠款计划支持的。
- 同时感谢北京市企业家环保基金会（阿拉善SEE）提供部分资金支持。本文内容及意见仅代表主办单位的观点，与阿拉善SEE的立场或政策无关。



SGP The GEF
Small Grants
Programme



阿拉善SEE
ALASHAN SEE
ASSOCIATION OF ENVIRONMENTALISTS & BUSINESS

创绿家
GREEN HOME

文字：姜超 / 磐之石环境与能源研究中心，王昱瑞 / 清华大学能源与动力工程系硕士研究生

校对：无毒先锋 版式设计：莫存柱 图片拍摄：部分专业图片来源于网络

版权所有：©深圳市零废弃环保公益事业发展中心，2020，保留所有权利

解毒档案

档案时间:2020.5

无毒先锋

第11期