

自然灾害现场饮用水处理技术的系统评价

刘真 张林 唐甜 黄国荣 熊鸿燕

【导读】 系统评价全球近 20 年来有关灾后饮用水处理方法及效果的文献,为灾后卫生救援中开展饮用水处理和供应提供当前最佳证据。通过文献检索与评价,共纳入 22 篇文献。本研究主要结论:目前在发达国家和国际灾难救援中,针对应急状态的水处理和供应问题逐渐形成较为规范、成熟的方法;简易的水处理技术在灾难救援中也发挥着重要作用。

【关键词】 自然灾害; 饮用水处理; 系统评价

Systematic review of water treatment technologies in the natural disaster stricken area Liu Zhen, ZHANG Lin, TANG Tian, HUANG Guo-rong, XIONG Hong-yan. Third Military Medical University, Chongqing 400038, China

Corresponding author: XIONG Hong-yan, Email: hongyanxiong@sohu.com

This work was supported by a grant from the National Key Technology R & D Program (No. 2008BAD96B06).

【Introduction】 Systematical evaluate the literature about application and effect of post-disaster water treatment methods in the recent 20 years through a comprehensive search and collection, to provide the best evidence for decision-making of post-disaster water treatment in the future. The main conclusion are the methodology of water treatment and supply in disaster rescue of developed countries and the world has been comparatively formal and mature. Some simple methods of water supply and treatment play a relatively important part in the disaster rescues.

【Key words】 Natural disasters; Water treatment; Systematic review

自然灾害可能造成饮用水供应系统的破坏,使灾后早期即发生大规模肠道传染病的暴发和流行。如 2005 年巴基斯坦地震后,由于饮用水的污染,一个月内灾区有 23 405 人出现感染性腹泻症状^[1]。此外,灾害使许多饮用水源枯竭,导致饮用水源集中,一旦这些水源受到污染,将会造成疾病的暴发,如 2006 年我国四川省巴塘县遭受了历史以来最严重的干旱,由于集中水源的污染发生了极为严重的细菌性痢疾流行^[2]。因此,在自然灾害救援中,饮用水的安全保障是重要的任务之一。如何科学、经济、有效开展相关工作是国际社会的关注热点。本研究旨在通过检索与评估相关文献,系统评价全球近 20 年来自然灾害后有关饮用水处理的方法和效果。

一、资料与方法

1. 检索策略:①数据库检索:中国期刊全文数据库(1990—2009年)检索:水(处理-消毒-防疫-传染病),灾区-灾难,水、卫生应急;PubMed, Science Direct, OVID, EMBASE, Springer, Highwire Press, Cochrane Library(1990—2009)检索:water (treatment or disposal or disinfection or epidemic or infectious disease) (disaster or emergency)。②其他检索资源:WHO 官方网站、美国疾病预防控制中心官方

网站、中国水利水电科学研究院网站;并通过 Google 查找其他与灾后防疫相关网站。

2. 文献评价与信息提取:采用临床流行病学有关描述性研究及综述的评价方法严格评价纳入文献,保证文章提供信息的客观性。对纳入研究的文献进行归类 and 描述,剔除观点性文章、文摘、报纸等类型的文章,并根据其结论是否引用他人观点作为评价其质量的依据,从而保证文章信息的可靠性。同时收集纳入文献中有关灾后饮用水处理的相关信息,如灾区人口数量、规模、居住地点和聚居密度,灾区水源、供水系统的破坏程度及重建情况,在灾区使用水处理设备与技术方法等。

表 1 灾后临时供水方法特点比较

方法	优点	缺点
瓶装水	水质安全;运输方便;群众认可度较高;可暂时缓解灾后的饮用水危机	供水量少;成本高
水车供水	供水方便、迅速;供水量较大;方便灾民取水;水质相对安全;成本相对较低;最为常用	灾区附近需要有安全水源;需要保证交通顺畅;在运输、灾民取水及水车清洁的过程中,易造成二次污染
小型一体化移动供水处理装置	经处理后水质好	大部分运输困难、造价高、制水量有限、运行和维修成本高,无法大范围使用

二、结果

按照检索策略共检出 3876 条结果,其中中文 590 条、英文 3286 条;经初筛和最终筛选,最终纳入 22 篇文献^[3-24]。包

DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-6450.2010.12.023

基金项目:国家科技支撑计划(2008BAD96B06)

作者单位:400038 重庆,第三军医大学军事预防医学院军队流行病学教研室

通信作者:熊鸿燕, Email: hongyanxiong@sohu.com

括 1 篇系统评价, 11 篇原始研究, 6 篇综述, 4 篇技术报告。主要涉及灾后临时供水、水源重建、水源管理和饮用水净化处理技术等内容。

1. 灾后应急期供水策略及技术:

(1) 临时性供水: 灾后 1 周内为应急阶段^[1]。该阶段主要解决维持生命的饮水。因此, 重点是保证足量临时供水和寻找安全水源, 并保护其不受污染。按照联合国难民署的规定, 应急条件下, 每人安全饮用水需求量至少为 7 L/d^[4]。在紧急情况发生时, 有三种临时供水方案, 即瓶装水、水车供水和小型一体化移动供水处理装置^[5,6]。表 1 显示了三种方法的应用特点, 其中小型一体化移动供水处理装置近年来技术发展迅速, 一些新型设备正逐渐应用于自然灾害救援(表 2), 这些设备以微孔过滤与化学(或物理)消毒联合作用为原理, 克服了传统移动供水装置运输困难、供水量限制等弱点^[7]。

目前一体化水处理设备大致分为三类: ①以反渗透膜(RO)为核心, 集预处理、活性炭吸附、紫外线消毒为一体的净化设备, 适用于各种水源, 出水水质基本为可直接饮用的纯净水, 安全性高, 但运行能耗较高。目前我国自主研发的碟管式反渗透移动应急供水系统——饮用水应急救援车, 在“5·12”汶川地震后解决了数万名受灾群众的饮水问题。②以超滤膜为核心, 集预处理、紫外线消毒为一体的净化设备, 适用于水中不含有溶解性有害物质的水源; 无预处理时, 只适用于水质较好的地下水和泉水。超滤膜系统无需加药就能去除水中的各种杂质和细菌, 出水浊度低、微生物指标安全, 但不能去除水中的溶解性有害物质, 为延长膜使用寿命, 应尽可能选用水质良好的地下水和山泉水作为供水水源。国产 PVC 超滤膜在“5·12”汶川地震灾区的应急供水中发挥了重要作用。③集混凝、沉淀、过滤、消毒为一体的常规水处理设备, 主要是去除水中的泥沙和悬浮物, 适用于水中不含溶解性有害物质的各种水源。

如果灾难发生在十分偏远的地区, 或者当地资源匮乏, 外

来救援无法及时到达, 可以采取一些简易的采水技术暂时应对灾民对饮水的迫切需求, 如收集雨水和阳光蒸馏法集水。

(2) 重建水源和保护: 灾后集中式供水水源被破坏或污染严重时, 应立即选择新的水源。雨水、地表水(河流/泻湖)和地下水是主要的选择源。其中地表水易污染, 要谨慎选用; 雨水易受大气、鸟类排泄物以及屋顶和沟槽污染, 但若管理方式得当, 可以成为非常有益的水源; 若钻孔位置合适、建造和维护恰当, 地下水一般不会被污染, 应优先考虑^[4]。

在自然和社会环境的影响下, 灾后水源容易被污染, 在选址的时候一定要进行相关的流行病学调查, 掌握当地可用水的来源、流向, 源头是否受污染及受灾人群饮水习惯和居住人口等问题。如果条件允许要进行水质检测和定期水质监测。对于未污染或新确定的水源, 划出一定范围的水源保护区(地表水一般为取水点上游 1000 m 至下游 100 m 的区域), 禁止在此区域内排放粪便、污水和垃圾, 并设专人管理。如果把河流作为水源, 应将其分为三段, 上段为人饮用水, 中段为人洗用水, 下段作为牲畜饮用水。

2. 灾后恢复期供水策略和技术: 灾后恢复期一般是指在灾后 1 周后至逐渐走上正常生活的阶段^[1]。此期最关键问题是防止因饮水污染而引发肠道传染病疫情。重点工作是供水管理、社区卫生宣传和水的净化处理。

(1) 供水管理: 水源管理工作在灾后恢复期十分重要。在不同地区有不同的供水结构与设施, 因此要根据具体情况逐步建立规范的管理(表 3), 同时加强水质的评估与检测。因为水质的评估与检测的目的是在潜在卫生问题出现之前, 及时发现并采取应对措施, 将其可能带来的不良后果降到最低水平^[3-5,16]。

(2) 水的净化处理: ①大型水体处理技术: 灾后在群体水平上保证饮用水的供给和安全是非常重要的工作内容。大型水体净化最常用的方法是氯化消毒(保证水中余氯浓度保持在 0.3 ~ 0.5 mg/L)^[4]。但该方法对某些原生动物和蠕虫类

表 2 新型应急水处理设备

设备名称	关键技术	水处理能力	主要特点	应用事件/地区	应用时期
地表水净化系统 ^[25]	过滤、消毒	380 L/min	外形小巧; 净化效能高(任何水源均可应用); 通量大; 成本低	土耳其地震、委内瑞拉洪灾	应急期, 安装后可长期使用
HTI Life Pack 过滤器 ^[26]	膜过滤、消毒	3 L/d	净化效能高(任何水源均可应用); 不需电力; 通量较小	2005 年卡特里娜飓风	应急期
应急过滤袋 ^[8,27]	膜过滤	每人 10 d 水量	净化效能高(任何水源均可应用); 不需额外加压; 轻便	2005 年卡特里娜飓风	应急期
微液压水处理装置 ^[9]	混凝沉淀、过滤(沙滤、活性炭吸附)消毒	4 × 10 ⁴ ~ 5 × 10 ⁴ L/d	净化效能高(可应用于浑浊度高达 10 000 NTU 的原水); 安装方便; 操作简单	2004 年印度尼西亚海啸; 2006 年 Jogjajarta 地震; 2006 年 Pangandaran 海啸	应急期
太阳能立方 ^[28]	反渗透膜过滤	13 m ³ /d	运输方便、安装简易; 通量较大; 可同时发电; 能源来自太阳能与风能	亚洲和南美洲偏远地区、2005 年巴基斯坦地震	应急期
基于斜发沸石的微过滤、紫外消毒水过滤器 ^[10]	微过滤、紫外消毒	0.5 ~ 100 m ³ /d	过滤能力强(直径 1 ~ 2 μm 的粒子); 净化过程高效灵活; 形式多样(便携式、移动式、固定式、大型的一站式); 安装简易	泰国海啸	应急期; 可便携式、移动式; 灾难后期; 固定式、大型一站式
超滤膜过滤系统 ^[11]	超滤膜过滤、氯化消毒	1000 L/h	净化效能高(任何水源均可应用); 通量较大; 使用简便; 轻便, 易于装运; 有自动清洗功能	法国马赛市消防救援	应急期

表 3 灾后不同类型地区的供水管理

类型	措 施
集中供水地区 (城镇)	水源地清理消毒;水处理设备和净水建筑物的清理消毒;修复自来水供水管道,供水前进行清洁消毒;提高出厂水的余氯浓度;条件允许时对水厂进行全水质检测
分散供水地区 (农村)	寻找相对固定的水源,做好水源保护,划分用水区域;加强水的消毒,每天进行水质检测;引水设备最好选用食用级材料
灾民安置点	优先采取集中式供水,安装市政自来水供水点;保证每人每天至少 20 L 水;定时水质检测(每日至少 2 次);污水集中排放

无效^[7]。为保证其持续杀菌能力,要定期进行余氯检测,且处理后的水其感官指标较差。但该方法消毒效率高,消毒效果易于测量,可及性好,成本低,投量准确,设备简单,至今广泛应用^[15]。②小型水体处理技术:在灾民居住分散、资源匮乏的情况下,除氯化消毒处理外,一些简易的技术方法会更为有效和容易实施,如物理法(煮沸、陶瓷过滤、沙滤沉淀、阳

光消毒)、化学法(氯化消毒、混凝)以及物理与化学结合的方法(氯化-过滤法、混凝-氯化法),见表 4。

在众多方法中,煮沸法是最为简易而有效的消毒方法。WHO 在灾后应急简易水处理指导手册中明确指出煮沸法是最能保证饮用水安全的消毒方法^[16]。Ram 等^[16]、Gupta 等^[17]通过研究灾后人群自行水处理行为发现,煮沸法在人群中知晓率最高,且接受度最好。当能源匮乏,化学消毒产品又不可及时供应情况下,可采用阳光消毒法临时应对灾民的饮水短缺问题。Conroy 等^[23]在研究中发现,该方法可以显著降低感染性腹泻的发病率,且操作简便,不需要额外的能源。另外, PUR 净化粉剂也是目前应用十分广泛的应急水处理产品,如 PUR 可用水处理方法减少 30%~50% 的腹泻疾病^[15]。

3. 社区卫生宣传:争取当地政府在人力、物力上给予支持,并请当地政府加强对灾民点卫生防病组织领导,组织灾民配合相关卫生部门共同防病。利用当地一切可用的媒体(电视、广播、报纸、短信、海报、传单、小册子等)向灾民宣

表 4 应急简易水处理方法比较

方法	内容步骤	产品/设备	优点	缺点	备注
煮沸法 ^[17-19]	①消毒:100℃ 5 min,有条件时可持续 20 min; ②改善味道:沸腾过程中搅拌;冷却后置于密封容器中晃动;在 2 个容器之间来回倾倒	-	完全灭活病原体;操作简便;无残留毒性	消耗能源;处理后的水可能会有不适口感	不适于高海拔地区
陶瓷过滤法 ^[22]	陶瓷滤芯管的过滤孔径为 0.1 mm,管中填充活性炭	陶瓷过滤器	可除悬浮颗粒;滤芯可重复使用;可当地取材制造;无残留毒性	不能完全杀灭病原体;需定期进行清洗与维护;滤速较慢(1~2 L/h)	-
沙滤法 ^[14,26]	选择约 1 m 深的容器(鼓状塑料或镀锌金属材料较好),里面填满滤料:从底部向上第一层 5 cm 厚的小石子;第二层 5 cm 厚的粗沙;第三层 40 cm 厚细沙。容器底部接水管	简易沙滤器	能部分去除病原体;使用方便,显著去除悬浮颗粒;改善水的口感;取材方便;不需维护,寿命长	不能除去病毒;不便于运输,初成本较高	无条件时,也可在离水源 3~5 m 处挖一个 0.5~0.8 m 深、直径约 1 m 的坑,取坑壁自然渗出的水饮用
阳光消毒法 ^[23]	取干净透明容器,装入 3/4 量摇晃 20 min(除去易挥发物质)后完全灌满,阳光下晒 5~6 h(天气多云连续晒 2 d)。若水温达到 50℃,仅需晒 1 h。增加效力方法:瓶身一半包黑纸(或涂黑或将瓶置于黑色的瓦片上),以增加吸热效果;另一半面对阳光照射	-	可有效除去病原体;成本低、操作方便;处理后水口感较好;无残留毒性	不适于浑浊度较高(NTU>30)的原水;处理量较小,处理时间长;需大量无破损、清洁、合适的透明容器	不同的容器消毒效果不同:塑料袋(除去 90% 病原体)、塑料瓶(75%)、玻璃瓶(70%)
存储和沉淀法(3 罐水法) ^[21]	配备 3 个储水罐:将原水倒入 1 罐—净置 2 d 后慢慢将 1 罐中的存水倒入 2 罐—净置 2 d 后慢慢将 2 罐中的存水倒入 3 罐—净置 2 d 取第 3 罐饮用(反复循环)	3 罐水系统	有效降低原水的浑浊度;操作简便;成本低	不能完全除去病原体,效果具有可变性;后续需进一步消毒处理	适宜使用小口、带盖体的储水容器
氯化法 ^[20]	同大型水体处理技术	-	-	-	-
混凝法 ^[18,20]	以明矾为混凝剂,每 25 L 水,加入 167 g 活性炭(可用 1 kg 碎木炭代替)、11 g 碳酸氢钠(可用 64 g 木灰代替);搅拌 20 min,再加入 11 g 提前溶解的明矾,作用时间 30 min	-	有效除去悬浮颗粒;混凝剂取材方便,成本较低;操作简便	不能有效除去病原体;后续还需过滤或消毒处理	可用马齿苋或榆树皮捣烂替代混凝剂
过滤-氯化法 ^[24]	2 个桶型结构组成,上桶内装有聚丙烯线型过滤器,下桶内装有活性炭过滤器。使用时,将水灌入上桶,加入消毒剂作用 30 min,打开上桶的阀门,进入下桶过滤	GWI 净化器	除菌能力强(即使原水浑浊度高);有持续杀菌能力;操作方便,有效改善水的观感;无残留毒性	需定期更换过滤器;维护费用较高	-
混凝-氯化法 ^[15,24]	PUR 净化粉剂由宝洁和美国传染病中心研发。融合氯消毒配方和混凝剂,把整个污水处理程序浓缩成一小包混合物。一袋粉剂处理 10 L 水。搅拌 5 min 直到水澄清;用一块干净的棉布过滤;取清水静置 20 min 后可使用	PUR 净化粉剂	净化能力强,作用范围广;有持续杀菌能力;无残留毒性;包装小巧易于运输分发,保质期长	成本相对较高	-

讲有关饮水卫生知识;组织灾民学习基本的家庭饮用水处理方法^[3,16]。

三、讨论

在多种水处理净化方法中,小型水体的简易净化法最为经济,对环境条件要求低,利于环境保护,十分适合灾后应急应用。但从现有报道资料看,在灾难现场,简易小型水体处理技术在实施推广上仍存在一些问題^[3]。主要原因:①灾后应急阶段对饮用水量的要求大于对质量的要求;②灾后形势混乱、资源匮乏,有效组织居民自行水处理较为困难,且灾民的依从性较差;③灾后卫生部门及相关组织对灾民的干预信息较多,此时再向灾民推广新的水处理方法,往往会与其他干预信息混淆,降低实施力度。因此,在现场救援中,应当重视这一问题,积极推广相关技术,加强在群众中普及简易水处理知识,并根据实际环境特点,在灾难发生时能够立即选择出快捷可得、最适用的方法。

目前很多生产水处理产品的企业都在与卫生组织或国际救援组织合作,致力于应急水处理设备的设计和研发^[6]。这些应急水处理设备具有快速、安全的优势,在灾后救援的安全供水方面占有极其重要的地位。但这类产品也存在造价高、运行和维修成本高,无法大范围使用,大部分需要电能支持等缺点。如何降低成本、增加通量和适合野外环境使用,将是今后研发的方向。

参 考 文 献

- [1] Ligon BL. Infectious diseases that pose specific challenges after natural disasters: a review. *Semin Pediatr Infect Dis*, 2006, 17: 36-45.
- [2] Chinese Center for Disease Control and Prevention. Infectious disease control after natural disasters [DB/OL]. <http://www.chinacdc.net.cn>. (in Chinese)
中国疾病预防控制中心. 自然灾害后传染病的控制 [DB/OL]. <http://www.chinacdc.net.cn>.
- [3] Clasen T, Smith L. The drinking water response to the Indian Ocean tsunami, including the role of household water treatment. *Disaster Prevention and Management*, 2006, 15(1): 190-201.
- [4] WHO. Water supply, environmental health in emergencies [DB/OL]. <http://www.who.int>.
- [5] Heidari MK, Heidari F. Drinking water management and supply after natural disasters like earthquake. *Disaster Management and Response*, 2004, 2(1): 10-13.
- [6] Fernando WBG, Gunapala AH, Jayantha WA. Water supply and sanitation needs in a disaster-lessons learned through the tsunami disaster in Sri Lanka. *Desalination*, 2009, 248: 14-21.
- [7] Clarke BA, Steele A. Water treatment systems for relief agencies: the on-going search for the 'Silver Bullet'. *Desalination*, 2009, 248: 64-71.
- [8] Arnal-Arnal JM, Fernandez MS, Verdti GM, et al. Design of a membrane facility for water potabilization and its application to Third World Countries. *Desalination*, 2001, 137: 63-69.
- [9] Garsadi R, Salim HT, Soekarno I, et al. Operational experience with a micro hydraulic mobile water treatment plant in Indonesia after the "Tsunami of 2004". *Desalination*, 2009, 248: 91-98.
- [10] Harleman C, Jacks G, Rybeck B. The use of a clinoptilolite-based filter in emergency situations. *Desalination*, 2009, 248: 629-635.
- [11] Barbot E, Carretier E, Wyart Y, et al. Transportable membrane process to produce drinking water. *Desalination*, 2009, 248: 58-63.
- [12] Amin MT, Han MY. Water environmental and sanitation status in disaster relief of Pakistan's 2005 earthquake. *Desalination*, 2009, 248: 436-445.
- [13] Hoque BA, Alam MJ, Sack RB. Household disinfection of drinking water. *IAHS Publ*, 1995, 233: 31-34.
- [14] Clasen T, Roberts I, Rabie T, et al. Interventions to improve water quality for preventing diarrhoea (Review) [DB/OL]. The Cochrane Collaboration, 2006.
- [15] Doocy SG, Burnham. Point-of-use water treatment and diarrhoea reduction in the emergency context: an effectiveness trial in Liberia. *Tropical Med Int Health*, 2006, 2(10): 1542-1552.
- [16] Ram PK, Blanton E, Klinghoffer D, et al. Household water disinfection in hurricane-affected communities of Louisiana: implications for disaster preparedness for the general public. *Am J Public Health*, 2007, 97(1): 130-135.
- [17] Gupta SK, Suantio AS, Gray A, et al. Factors associated with *E. coli* contamination of household drinking water among tsunami and earthquake survivors, Indonesia. *Am Soc Trop Med Hyg*, 2007, 76(6): 1158-1162.
- [18] WHO. Household water treatment and safe storage following emergencies and disasters [DB/OL]. <http://www.who.int>.
- [19] WHO. Guide to promotion of drinking-water disinfection in emergencies [DB/OL]. 2004.
- [20] Dorea CC. Coagulant-based emergency water treatment. *Desalination*, 2009, 248: 84-90.
- [21] WHO. Emergency treatment of drinking water at point-of-use [DB/OL]. <http://www.who.int>.
- [22] Clasen T, Boisson S. Household-based ceramic water filters for the treatment of drinking water in disaster response: an assessment of a pilot program in the Dominican Republic. *Water Practice Technol*, 2006, 1(2): 15-21.
- [23] Conroy RM, Elmore-Meegan M, Joyce T, et al. Solar disinfection of drinking water and diarrhoea in Maasai children: a controlled field trial. *Lancet*, 1996, 348: 1695-1697.
- [24] Lantagne DS, Quick R, Mintz ED. Household water treatment and safe storage options in developing countries: a review of current implementation practices [DB/OL]. www.wilsoncenter.org/water.
- [25] Tempest Environmental Systems. A global leader in water purification equipment and services for emergency disaster response [DB/OL]. <http://www.aquapura.com>.
- [26] Hydration Technology Innovations. Filter provides clean drinking water during natural disasters. *Memb Technol*, 2009: 3-4.
- [27] Atkinson S. Membrane and filtration companies aid Katrina recovery efforts. *Memb Technol*, 2005: 7-8.
- [28] Spectra Watermakers Inc. Solar-powered unit provides drinking water. *Memb Technol*, 2007: 4-5.

(收稿日期:2010-03-25)

(本文编辑:张林东)