

突发饮用水污染事件人群健康风险评估方法的探讨：以江苏镇江苯酚水污染事件为例

郑浩¹, 丁震¹, 高圣华², 张岚², 徐燕¹

1. 江苏省疾病预防控制中心环境与健康所, 江苏 南京 210009

2. 中国疾病预防控制中心环境与健康相关产品安全所, 北京 100050

摘要：

[背景] 发生突发饮用水污染事件时, 需要对水中污染物可能产生的人群健康风险进行评估。现行的饮用水卫生标准不能满足人群短期暴露风险评估的需求, 相关的评估方法技术体系也不健全, 有待于进一步研究和探讨。

[目的] 基于突发饮用水污染事件, 定量评估污染物可能对人群健康产生的危害程度。

[方法] 在美国环境保护署推荐的四步法(危害识别、剂量-反应关系评估、暴露评估、风险表征)基础上, 根据化学污染物短期暴露特点进行人群健康风险评估。风险评估的时间分为1 d和10 d, 根据人群实际暴露时间, 选择制订1 d或10 d的饮用水污染物短期暴露安全阈值(SWSC)。风险表征以危害商(HQ)大小进行定量评估。以2012年江苏镇江苯酚水污染事件为例, 进行人群健康风险评估。

[结果] 2012年江苏镇江苯酚水污染事件中, 人群暴露于污染物的时间为3 d, 饮用水苯酚污染质量浓度为0.132 mg·L⁻¹, 饮用水苯酚的SWSC为6 mg·L⁻¹。经计算HQ为0.022, 认为该事件中苯酚暴露浓度对人群产生的健康风险处于可接受水平。

[结论] 本研究基于饮用水化学污染物毒性阐明污染物SWSC的推导方法, 适用于发生突发饮用水污染事件时, 定量评估人群短期暴露于污染物的健康风险水平。

关键词：健康风险评估；饮用水；污染物；突发事件；短期暴露

Health risk assessment of drinking water pollutants in emergencies: Phenol water pollution event in Zhenjiang, Jiangsu ZHENG Hao¹, DING Zhen¹, GAO Sheng-hua², ZHANG Lan², XU Yan¹ (1.Department of Environmental Health, Jiangsu Provincial Center for Disease Control and Prevention, Nanjing, Jiangsu 210009, China; 2.National Institute of Environmental Health, Chinese Center for Disease Control and Prevention, Beijing 100050, China)

Abstract:

[Background] It is essential to assess the health risks of pollutants in drinking water among exposed populations in the context of drinking water pollution events. Current criterion in China are not suitable for short-term exposure assessment of drinking water pollutants, and relevant methodologies remain inadequate and need to be improved.

[Objective] This study is conducted to assess the human health risk of drinking water pollutants in an emergency.

[Methods] The modified four steps of health risk assessment (hazard identification, dose-response assessment, exposure assessment, and risk characterization) recommended by the United States Environmental Protection Agency were used in the present study. One-day or ten-day short-term drinking water safety concentration (SWSC) was defined according to actual exposure durations. Hazard quotient (HQ) was applied for assessing human health risk of drinking water pollutants in emergencies. Based on the phenol water pollution event in Zhenjiang of Jiangsu in 2012, a health risk assessment was conducted.

[Results] In the drinking water pollution event of Zhenjiang City in 2012, the exposure duration of the population was 3 d. The exposure concentration and SWSC of phenol in drinking water was 0.132 mg·L⁻¹ and 6 mg·L⁻¹, respectively. The HQ was hereby calculated as 0.022 according to the equation developed in the study. The health risk induced by exposure to phenol in the emergency was acceptable.

DOI 10.13213/j.cnki.jeom.2020.19895

基金项目

江苏省卫生健康委面上项目(H2018094)

作者简介

郑浩(1980—), 男, 硕士, 副主任医师;
E-mail: zhenghao@jscdc.cn

通信作者

郑浩, E-mail: zhenghao@jscdc.cn

利益冲突 无申报

收稿日期 2019-12-25

录用日期 2020-05-20

文章编号 2095-9982(2020)07-0690-05

中图分类号 R123.1

文献标志码 A

►引用

郑浩, 丁震, 高圣华, 等. 突发饮用水污染事件人群健康风险评估方法的探讨: 以江苏镇江苯酚水污染事件为例[J]. 环境与职业医学, 2020, 37(7): 690-694.

►本文链接

www.jeom.org/article/cn/10.13213/j.cnki.jeom.2020.19895

Funding

This study was funded.

Correspondence to

ZHENG Hao, E-mail: zhenghao@jscdc.cn

Competing interests None declared

Received 2019-12-25

Accepted 2020-05-20

►To cite

ZHENG Hao, DING Zhen, GAO Sheng-hua, et al. Health risk assessment of drinking water pollutants in emergencies: Phenol water pollution event in Zhenjiang, Jiangsu[J]. Journal of Environmental and Occupational Medicine, 2020, 37(7): 690-694.

►Link to this article

www.jeom.org/article/en/10.13213/j.cnki.jeom.2020.19895

[Conclusion] The methodology based on the toxicity of water pollutants could reveal pollutant SWSC, and quantitatively assess the short-term health risk of drinking water pollutants in emergencies.

Keywords: health risk assessment; drinking water; pollutant; emergency; short-term exposure

近年来,我国突发饮用水污染事件频发,例如:2005年松花江硝基苯污染,2012年江苏镇江苯酚污染,2013年广西贺州镉及铊污染,2016年江西新余镉、铊、砷污染等。这些污染事件涉及范围广,影响人数多,对人民群众的身体健康造成极大威胁,也给卫生应急处置工作带来了极大挑战。在污染事件发生时,由于人群暴露于污染物的时间较短,常常不会发生与污染物直接相关的人群疾病,但污染物对人体可能造成的潜在危害不容忽视,需要采取科学的方法开展人群健康风险评估工作,对污染物可能对人群健康产生的危害水平进行评估。

然而,目前突发饮用水污染事件中污染物短期暴露人群健康风险评估方法的技术体系还不健全,可参考的资料较少。我国现行的GB 5749—2006《生活饮用水卫生标准》中污染物限值是依据成人终生每日饮用2 L水不产生任何健康损害为目标进行推导的^[1],并不适用于短期暴露状态下的人群健康风险评估。GJB 651—89《军队战时饮用水卫生标准》是国内部队系统发生战争等特殊情况下适用的饮用水水质卫生标准,将饮水期限划分为7 d和90 d,各项指标的限值以不发生急性中毒,能保持军队战斗力为目标而定,标准适用人群仅为健康的军人^[2]。

世界卫生组织(World Health Organization, WHO)饮水水质准则中鼓励各国制订应急条件下污染物急性参考剂量(acute reference doses, ARfD),以此为依据开展人群健康风险评估^[3]。国际农药残留联合会对100多种农药制订了ARfD值^[4];Solecki等^[5]提出了建立农药中ARfD的基本原则和步骤;在此基础上,Yoshida等^[6]强调了24 h急性毒理学资料在评估中的重要性;Donohue等^[7]提出了饮用水污染物水质指标健康指导值(health advisory, HA)的推导方法及应用准则。2018年,美国环境保护署(Environmental Protection Agency, EPA)更新了基于对敏感人群保护(将儿童作为敏感人群的代表)的HA,该方法通过风险评估的推导原则将评估时间分为1 d和10 d^[8]。

国内学者针对应急状态下水质风险评估方法提出了一些解决思路:秦海宏等^[9]、尚琪^[10]提出要建立饮水分级标准,应对应急水质评估的问题;何恩奇

等^[11]提出应急状态下根据不同暴露时间划分水质的三级标准,该标准主要参照世界发达国家水质标准限值制定,并没有依据国际通用的风险评估推导准则进行计算;郑丙辉等^[12]、赵灿等^[13]提出了基于人群健康的水污染事件污染物安全阈值推导方法,并没有具体说明如何结合突发饮用水污染事件评估人群健康风险。本课题组在前期工作中,参考WHO、美国、欧盟的污染物标准限值,提出了7 d和30 d两个时限的水质限值标准,对应急状态下的水质评估进行了初步探讨^[14-15],但仍未能从方法学角度说明评估的步骤和内容。

本研究在美国EPA推荐的风险评估四步法基础上,阐明突发饮用水污染事件化学污染物短期暴露人群健康风险评估的步骤和方法,并结合2012年江苏镇江苯酚水污染案例进行评估。本研究旨在为开展突发水污染事件卫生应急处置以及人群健康风险评估工作提供参考依据。

1 材料与方法

本研究所指的突发饮用水污染事件是由人为因素或自然灾害引起的,大量化学污染物在短时间内进入水体或供水管网,造成水质在短时间内恶化,导致或可能导致人群健康损害的事件。饮用水污染物是指符合污染事件污染特征的化学污染物。本研究只考虑污染物经口暴露途径,基于饮用水化学污染物短期经口暴露的毒理学资料,评估人群健康风险水平。

根据我国突发饮用水污染事件的持续时间,同时参考美国EPA水质HA的制订原则^[7],将饮用水污染物评估的时间分为1 d和10 d两个期限。评估时根据人群的实际暴露天数,选择制订1 d或10 d的饮用水污染物短期暴露安全阈值(short-term drinking water safety concentration, SWSC)。1 d的SWSC是指饮用水污染物在1 d内不会对人体造成健康风险的浓度限值,10 d的SWSC是指饮用水污染物在10 d内不会对人体造成健康风险的浓度限值。

评估的程序和内容主要包括危害识别、剂量-反应关系评估、暴露评估、风险表征、不确定性分析5个步骤。危害识别和剂量-反应关系评估构成危害评

估。危害评估确定污染物的毒性作用和毒作用模式，为暴露评估提供依据。暴露评估确定的饮用水暴露时间和暴露水平信息，为危害评估确定重点关注的健康结局提供线索和依据。

1.1 危害识别

确定突发饮用水污染事件中化学污染物是否会产生健康危害、产生危害的依据及危害的程度等。对污染物理化特性、吸收、分布、代谢、排泄、毒理学和药物代谢动力学性质、人体对该物质的暴露途径以及其在人体内新陈代谢作用进行描述。

按照危害性质，化学污染物对人体的健康风险可以分为非致癌风险和致癌风险，致癌风险多在化学污染物长期暴露条件下开展评估，本研究仅关注有阈值化学污染物的非致癌风险。

1.2 剂量-反应关系评估

剂量-反应关系评估是通过人群研究或动物实验的资料，确定适合于人的剂量-反应曲线，采用公式(1)推导出饮用水污染物参考剂量(reference doses, RfD)。

$$RfD = NOAEL \text{ or } LOAEL / UF \quad \text{公式(1),}$$

式中： RfD ，饮用水污染物参考剂量， $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ； $NOAEL$ (no observed adverse effect level)，未观察到有害作用的水平， $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ； $LOAEL$ (lowest observed adverse effect level)，观察到有害作用的最低水平， $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ； UF (uncertainty factor)，不确定系数，无单位。

1.2.1 $NOAEL$ 或 $LOAEL$ 值的确定 通过查询美国EPA综合风险信息系统和美国毒物与疾病登记署提供的化学品毒性信息，充分评估数据质量，筛选出污染物的 $NOAEL$ 或 $LOAEL$ ，从暴露时间为7d内和7~30d的毒理学数据库中进行评估和筛选，分别制订1d和10d的 $SWSC$ 。筛选的原则包括：

(1) 优先选用人体毒性资料。在选择人体毒性资料时，优先选用环境流行病学资料，若缺乏足够数据可选用职业流行病学资料，若缺乏足够人体毒性数据可采用动物毒性资料。

(2) 选择经口暴露的污染物毒性参数。对于同一暴露时间的不同毒性作用，选择最敏感的靶器官毒性参数作为最终的毒性参数。

(3) 无法得到 $NOAEL$ 时，可用 $LOAEL$ 来替代，并适当增大 UF 。

(4) 条件允许时可补充动物实验研究以获取污染

物短期暴露(1d或10d)的 $NOAEL$ 或 $LOAEL$ 。

1.2.2 UF 值的确定 UF 取值主要考虑两方面：一是实验结果的外推，包括从实验动物外推到一般人群(种间)以及从一般人群外推到特定人群(种内)；二是数据的局限性，如以 $LOAEL$ 代替 $NOAEL$ 等情况。 UF 通常的取值范围为10~1000，最高不超过3000。

1.3 暴露评估

1.3.1 饮用水中污染物暴露评估 可通过直接测定或从其他部门获取饮用水污染物的监测数据，以污染物浓度的最大值作为污染物的暴露浓度。水质检验方法可按照GB/T 5750—2006《生活饮用水标准检验方法》^[16]执行，该标准之外的污染物可参照国内其他行业和国际先进水质检验方法。

1.3.2 人群暴露评估 当暴露人群为全人群时，基于安全性考虑，以10kg体重的儿童作为保护的目标人群，以每日1L的饮水量作为暴露参数，饮水贡献率值设定为100%。在评估人体的暴露水平时，不仅要有污染物的浓度数据，还要结合供水人口数量、采集时间、周期和频率等信息进行综合评估。

1.4 风险表征

当饮用水污染物的毒性作用为非致癌效应时，应计算危害商(hazard quotient, HQ)定量评估其健康风险。

$$HQ = \frac{EC}{SWSC} \quad \text{公式(2),}$$

$$SWSC = \frac{RfD \times BW}{DWI} \quad \text{公式(3),}$$

式中： HQ (hazard quotient)，危害商，无单位； $SWSC$ (short-term drinking water safety concentration)，饮用水污染物短期暴露安全阈值， $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ； EC (exposure concentration)，饮用水污染物暴露质量浓度， $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ； BW (body weight)，体重，kg； DWI (daily water intake)，每日饮水量， $\text{L} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

当 $HQ \leq 1$ 时，可认为健康风险处于可接受水平，当 $HQ > 1$ 时，则认为健康风险超过可接受水平， HQ 的值越大，表明可能产生的健康风险越大。

1.5 不确定性分析

不确定性包括：

(1) 暴露人群的年龄和性别产生的不确定性。

(2) 污染物暴露浓度的不确定性，如测定仪器的不确定性会造成污染物监测浓度的不确定性。

(3) 利用污染物的毒性值评估健康风险时，由动

物实验外推到人的毒性值存在不确定性,暴露时间不匹配也可能引入不确定性。

2 结果

本研究结合2012年江苏镇江苯酚水污染案例进行人群健康风险评估。事件概述:2012年2月3日,江苏省镇江市金西水厂供应的自来水出现强烈异味,市民反映强烈。经市政府组织相关部门开展现场调查和水质检测,认定本次事件是由于长江水源苯酚污染所导致,饮用水中苯酚质量浓度范围为 $0.002\sim 0.132\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。采取有效控制措施后,2月5日饮用水中苯酚质量浓度恢复到GB 5749—2006《生活饮用水卫生标准》限值 $0.002\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以内。

2.1 危害识别

苯酚常温下为一种无色晶体,是生产某些树脂、杀菌剂、防腐剂以及药物的重要原料。苯酚对皮肤、黏膜有强烈的腐蚀作用,经口暴露的动物实验表明苯酚会引起胚胎体重降低、生长迟缓及发育异常等毒性作用^[17]。苯酚的暴露途径主要为职业场所的呼吸暴露或皮肤接触暴露,饮水途径占总暴露量的比例很低,饮用水中的苯酚经口暴露可被迅速吸收,引起消化道症状,但不会致癌。国际癌症研究机构将苯酚归为第3类,即对人的致癌性尚无法分类。美国EPA将苯酚列为D组,即不认为对人有致癌性^[18]。

2.2 剂量-反应关系评估

本次污染事件人群暴露时间为3d,应制订10d的SWSC。查询美国综合风险信息系统中苯酚的短期暴露毒理学资料:将22只雌性大鼠在妊娠第6~15天以30、60、 $120\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 三个剂量组用苯酚溶液进行灌胃处理,其中 $120\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 剂量组的大鼠胚胎体重低于对照组,从而得出苯酚的NOAEL和LOAEL分别为 $60\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 和 $120\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ ^[19],不确定系数为100(种间差异系数为10和种内差异系数为10,主要是参考美国EPA的制订原则,目前我国饮用水基准限值制订过程中基本上也是按照这个系数推算),则苯酚的RfD为 $0.6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 。

2.3 暴露评估

饮用水中污染物暴露评估:饮用水中苯酚质量浓度范围为 $0.002\sim 0.132\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,取最大值 $0.132\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

人群暴露评估:本次污染暴露人群为全人群,供水范围为镇江市市区约100万人。选择人群暴露参数为体重10kg,饮水量 $1\text{ L}\cdot\text{d}^{-1}$ 。

2.4 风险表征

$$SWSC = \frac{RfD \times BW}{DWI} = \frac{0.6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1} \times 10\text{ kg}}{1\text{ L}\cdot\text{d}^{-1}} = 6\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$$

$$HQ = \frac{EC}{SWSC} = \frac{0.132\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}}{6\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}} = 0.022$$

经计算HQ为0.022,可以认为本次事件饮用水中苯酚暴露浓度对人群产生的健康风险处于可接受水平。

2.5 不确定性分析

毒理学数据的不确定性:本次评估中采用苯酚短期暴露的NOAEL值为 $60\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$,不确定系数为100,考虑到人为设置动物实验剂量组等因素,毒理学数据取值具有一定的不确定性。

饮用水中苯酚质量浓度的不确定性:本次苯酚检测的最大值为 $0.132\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,但由于受到样品采样、检测时间和采样点设置的限制,饮用水中苯酚质量浓度存在一定的不确定性。

暴露参数的不确定性:本次评估中采用的暴露参数为体重10kg,每日饮水量为1L,在实际的暴露人群中如孕妇可能对苯酚暴露更加敏感。

3 讨论

开展饮用水化学污染物人群健康风险评估工作在突发饮用水污染事件卫生应急处置中具有重要意义。郑丙辉等^[12]、赵艳民等^[20]建立了水污染事件地表水中特征污染物安全阈值计算方法,并计算地表水硝基苯等指标短期暴露安全阈值,为突发水污染事件地表水健康风险评估提供了科学依据。本研究紧紧围绕污染物短期暴露的毒理学特征,在美国EPA推荐的风险评估四步法基础上阐明了开展饮用水化学污染物短期暴露人群健康风险评估的内容和方法,并结合江苏镇江苯酚水污染事件的实例开展研究,定量评估了污染物对人群健康可能造成的危害程度。经评估,该事件中饮用水苯酚污染所造成的健康风险为可接受水平($HQ=0.022$),在暴露人群中也未发现出现与苯酚毒性有关的健康危害。

由于化学污染物与微生物、放射性物质所致健康效应的机制不同,所采用的评估方法也不同。本研究主要针对饮用水中化学性污染物的评估,在短期暴露的应急状态下,也只考虑化学污染物非致癌风险。

饮用水污染物对人体的暴露途径包括经口、皮肤及呼吸道暴露三种,本研究只考虑了经口暴露途径,但对于一些挥发性污染物(如多环芳烃、卤代烃等),

经呼吸道或皮肤暴露也是很重要的暴露途径,经呼吸道和皮肤短期暴露的人群健康风险评估方法需要进一步研究。

在人群饮水暴露参数评估中,通常采用60 kg体重、每日饮用2 L水的暴露参数。考虑到在突发饮用水污染事件中,暴露人群往往为全人群,应以敏感人群(儿童)的饮水暴露参数进行评估,本研究采用10 kg体重、饮水量 $1\text{ L}\cdot\text{d}^{-1}$ 的暴露参数,主要参考了美国EPA推荐的做法。此外,是否还应将婴幼儿体重5 kg、饮水量 $0.75\text{ L}\cdot\text{d}^{-1}$ 作为暴露参数值得商讨,需要在今后的研究中进一步论证和完善。

在通常的饮用水暴露评估中,不同污染物饮用水暴露量占人体总暴露量的比例不同,默认值一般以10%~20%计算。在应急状态下,重点考虑化学污染物为短时间、高剂量的暴露,因此在计算饮用水污染物短期暴露安全阈值时忽略其他暴露途径所占的比例,认为饮用水暴露的比例为100%。

本研究成果能够进一步完善饮用水污染人群健康风险评估体系,对于科学评估应急状态下水质状况和人群健康风险、妥善处置突发饮用水污染事件、保障人民群众身体健康和维护社会稳定具有重大意义。

参考文献

- [1] 卫生部卫生标准委员会. GB 5749—2006《生活饮用水卫生标准》应用指南[M]. 北京:中国标准出版社, 2010: 7-8.
- [2] 侯悦, 蒋兴锦, 卓鉴波, 等. 军队战时饮用水卫生标准[J]. 解放军预防医学杂志, 1994, 12(2): 90-93.
- [3] World Health Organization. Guidelines for drinking-water quality, fourth edition [R]. Geneva: WHO, 2011.
- [4] World Health Organization. Joint FAO/WHO meeting on pesticide residues [R]. Geneva: FAO/WHO, 2016.
- [5] SOLECKI R, DAVIES L, DELLARCO V, et al. Guidance on setting of acute reference dose (ARfD) for pesticides [J]. Food Chem Toxicol, 2005, 43(11): 1569-1593.
- [6] YOSHIDA M, SUZUKI D, MATSUMOTO K, et al. Simulation of acute reference dose (ARfD) settings for pesticides in Japan [J]. J Toxicol Sci, 2013, 38(2): 205-214.
- [7] DONOHUE J M, LIPSCOMB J C. Health advisory values for drinking water contaminants and the methodology for determining acute exposure values [J]. Sci Total Environ, 2002, 288(1/2): 43-49.
- [8] United States Environmental Protection Agency. 2018 edition of the drinking water standards and health advisories tables [R]. Washington, DC: USEPA, 2018.
- [9] 秦海宏, 沈慧, 袁东, 等. 对“应急状况下生活饮用水安全性评价标准”制定的思考[J]. 环境与职业医学, 2009, 26(4): 419-420.
- [10] 尚琪. 关于广东北江水污染应急处理方法的思考[J]. 国际技术经济研究, 2006, 9(2): 50-53, 36.
- [11] 何恩奇, 周伟杰. 制订“突发性水污染事件时饮用水卫生监测评价及分级预警准则”初探[J]. 环境与职业医学, 2009, 26(4): 421-423.
- [12] 郑丙辉, 罗锦洪, 付青, 等. 基于人体健康风险的水污染事件污染物安全阈值研究[J]. 环境科学, 2012, 33(2): 337-341.
- [13] 赵灿, 高圣华, 张岚. 我国饮用水中污染物短期暴露健康风险参考值推导方法研究[J]. 环境卫生学杂志, 2018, 8(1): 7-11.
- [14] 郑浩, 于洋, 费娟, 等. 浅谈应急条件下饮用水水质的快速评估[J]. 环境卫生学杂志, 2015, 5(1): 32-35.
- [15] 郑浩, 于洋, 费娟, 等. 突发饮用水污染事件应急供水水质卫生标准的探讨[J]. 环境与职业医学, 2016, 33(1): 81-84.
- [16] 生活饮用水标准检验方法: GB/T 5750—2006 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [17] United States Environmental Protection Agency. Integrated risk information system (IRIS) on phenol [R]. Washington, DC: USEPA, 1999.
- [18] U.S. Department of Health and Human Services. Toxicological profile for phenol [R]. Atlanta, GA: ATSDR, 2008.
- [19] United States Environmental Protection Agency. Toxicological review of phenol [R]. Washington, DC: USEPA, 2002.
- [20] 赵艳民, 秦延文, 郑丙辉, 等. 突发性水污染事故应急健康风险评价[J]. 中国环境科学, 2014, 34(5): 1328-1335.

(英文编辑: 汪源; 责任编辑: 汪源)