

再生水雾化导致的病原微生物暴露剂量计算方法研究

谢兴, 胡洪营*, 郭美婷, 吴乾元

(清华大学环境科学与工程系, 环境生物学研究所, 北京 100084)

摘要:呼吸吸入是再生水利用过程中病原微生物的主要暴露途径之一. 本研究提出了呼吸途径病原微生物暴露剂量的计算方法. 首先根据再生水中病原微生物的浓度、喷洒强度和再生水雾化效率因子(雾化效率因子取值一般在0.003~0.01之间), 确定再生水喷洒过程中病原微生物的排放强度. 然后参考大气污染物扩散模型计算微生物气溶胶的分布, 并考虑病原微生物在环境中的衰减, 得出空气中病原微生物浓度. 病原微生物的衰减计算与其自身衰减因子和环境影响因子有关. 根据微生物种类的不同, 其在空气中的衰减因子在 $-0.23 \sim 0 \text{ s}^{-1}$ 之间, 而环境对微生物的影响因子在0.016~73之间. 最后结合呼吸速率和暴露时间求得呼吸途径的暴露剂量. 根据易感人群年龄、性别和活动强度的不同, 日平均呼吸速率在 $4.5 \sim 17 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 之间, 小时平均呼吸速率在 $0.3 \sim 3.2 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 之间. 本研究提出的方法可直接用于计算再生水利用用于农业灌溉、园林绿化以及水景喷泉过程中因再生水雾化导致的病原微生物暴露剂量.

关键词:污水再生利用; 呼吸途径; 暴露剂量; 微生物气溶胶; 风险评价

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)01-0070-05

Assessment Method of the Pathogenic Microbial Exposure Caused by Aerosolization of Reclaimed Water

XIE Xing, HU Hong-ying, GUO Mei-ting, WU Qian-yuan

(Division of Environmental Biology, Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Inhalation is one of the main exposure routes to pathogenic microorganisms during wastewater reuse. An applicable method is introduced to assess the pathogenic microbial exposure from inhalation. Firstly, emission intensity of pathogenic microorganisms during reclaimed water spraying is determined by the concentration of pathogenic microorganisms in reclaimed water, spraying intensity and aerosolizing efficiency factor. The value of the aerosolizing efficiency factor is usually between 0.003 and 0.01. Then the concentration of pathogenic microorganisms in air is calculated by referring to the model of air pollutant dispersion and considering the microorganisms decay. The value of the microbial viability decay factor is between -0.23 s^{-1} and 0 s^{-1} , and that of the environmental impact factor is between 0.016 and 73, varied by different kinds of microorganisms. And then the exposure from inhalation route can be finally attained by multiplying inhalation rate and exposure time. The daily average inhalation rate is $4.5 \sim 17 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$, and the hourly average inhalation rate is $0.3 \sim 3.2 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, differentiated by age, gender, and activity of susceptible population. The method proposed in this study can be directly used to assess the pathogenic microbial exposure caused by reclaimed water used for agriculture irrigation, gardening, or fountain spraying.

Key words: wastewater reuse; inhalation route; exposure assessment; microbial aerosol; risk assessment

城市污水再生利用是缓解水资源危机的有效途径. 然而, 城市污水中存在较高浓度的病原微生物, 其种类多达100种以上^[1]. 污水经过再生处理, 各种病原微生物含量均会有所下降, 但是在再生水中都仍有可能检出^[2~8]. 消毒能够有效降低再生水中病原微生物的含量, 但是传统的氯消毒过程会产生消毒副产物, 从而导致再生水的生物毒性升高^[9], 而紫外消毒等新的消毒方式又不能保证持续的灭菌效果^[10]. 因此再生水的利用存在一定的微生物健康风险.

在再生水的利用过程中, 人体接触病原微生物的可能途径主要有饮食摄入和呼吸吸入2种^[11]. 再生水进入环境水体或者回灌地下, 可能会污染地下水或者给水管渠, 从而使病原微生物进入饮用水系

统. 此外, 再生水用于农业灌溉, 一些不去皮的水果以及生食的蔬菜上都可能病原微生物残留. 再生水用于园林绿化、道路浇洒、农业灌溉、水景喷泉、洗车等时, 都伴随着再生水雾化的过程. 再生水雾化使其中的病原微生物进入到空气中, 形成微生物气溶胶, 并可随气流运动扩散^[12~14]. 气溶胶作为病原微生物的载体, 被人体吸入可以深入到肺泡^[14]. 有研究表明, 再生水喷灌使下风向至少200 m距离内的空气中粪大肠菌、粪链球菌、分支杆菌和大肠杆菌噬菌体的浓度明显高于周围背景值^[15].

收稿日期: 2008-01-21; 修订日期: 2008-04-25

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目(50825801)

作者简介: 谢兴(1984~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为污水再生利用的安全性, E-mail: xiex02@mails.tsinghua.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: hyhu@tsinghua.edu.cn

科学准确地计算病原微生物的暴露剂量是污水再生利用健康风险评价的重要前提。Asano 等^[16]对污水再生利用于不同途径的暴露剂量给出了估计值。这一估计值在之后许多的风险评价研究工作中广泛采用^[17~19]。但是 Asano 等的方法忽略了许多重要影响因素,如没有考虑同一使用途径下不同使用强度和暴露方式等问题。何星海等^[20]结合北京市再生水利用工程,通过现场调研和监测分析,提出了再生水用于公园绿化、道路降尘和冲洗作业时,职业人群和公众的再生水日摄入量和终生日均暴露剂量。这一方法为健康风险评价提供了定量依据,但是普适性不强,不易被其它研究者采用。因此,结合我国污水再生利用的实际情况,建立一种广泛适用于我国污水再生利用微生物健康风险定量评价的暴露计算方法,具有重要的意义。

从我国目前现状来看,饮用水一般都会经过煮沸后才饮用,而且蔬菜生食的情况也相对较少。因此,在我国再生水的利用过程中,雾化作用导致的呼吸吸入是人体对再生水中病原微生物暴露的主要途径。本研究基于再生水的雾化模型和空气污染物扩散模型,提出了再生水雾化导致的呼吸途径的病原微生物暴露剂量的一般计算方法。

1 空气中病原微生物浓度计算

确定空气中病原微生物的浓度是计算呼吸途径暴露剂量的前提。空气中的病原微生物浓度很低,即使因为再生水的使用导致空气中病原微生物浓度升高,其浓度值一般仍低于目前测试方法的检出限。这使得在计算暴露剂量时,空气中病原微生物浓度较难通过实际测定获得^[21],因此往往需要通过间接的手段或者借助模型进行估算。

间接测定即测定再生水中指示性微生物(如细菌总数、粪大肠杆菌)的浓度和病原微生物的浓度,求得两者的比例关系;再测定空气中指示性微生物的浓度,通过比例关系确定空气中病原微生物的浓度。这种方法具有一定的可行性。但是,不同的微生物在空气中的存活能力不同,如革兰氏阴性菌在干燥的扩散的气溶胶体系中存活能力较低,即使它们能存活一段时间,它们生长的能力也会显著下降^[13]。因此,再生水中微生物之间的比例关系不能代表其雾化并扩散一段距离后空气中病原微生物的浓度。

当空气中的病原微生物主要来自于再生水喷洒过程中的雾化作用时,其空气中的浓度可以按照以下模型进行计算^[22]。

$$c_{\text{air}} = Q \cdot D \cdot R + B \quad (1)$$

式中, c_{air} 为空气中的病原微生物浓度($\text{mass} \cdot \text{m}^{-3}$); Q 为排放源强度($\text{mass} \cdot \text{s}^{-1}$); D 为微生物气溶胶扩散系数($\text{s} \cdot \text{m}^{-3}$); R 为病原微生物衰减系数(无量纲); B 为背景病原微生物浓度($\text{mass} \cdot \text{m}^{-3}$),一般情况可以忽略。

1.1 排放源强度

再生水喷洒过程的雾化作用导致病原微生物进入空气,形成微生物气溶胶。排放病原微生物的强度与再生水中病原微生物浓度、喷洒强度和雾化因子有关。其中,再生水中病原微生物强度反映了不同的再生水水质,喷洒强度反映了不同的再生水使用方式和使用规模,雾化效率因子反映了不同的气象条件。排放源强度可以通过式(2)计算^[22]。

$$Q = c_{\text{water}} \cdot q \cdot A \quad (2)$$

式中, c_{water} 为再生水中病原微生物浓度($\text{mass} \cdot \text{m}^{-3}$); q 为喷洒强度($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$); A 为雾化效率因子(无量纲)。

通过对再生水水样的测定,确定再生水中病原微生物的浓度 c_{water} 。喷洒强度 q 可以通过流量计直接读取,或者通过现场调查,根据喷头的型号、数量、水压等计算确定。雾化效率因子 A 一般在 0.003 ~ 0.01 之间,具体数值可以根据式(3)计算^[22]。

$$\log_{10} A = 0.031t + 0.000\,096u \cdot i - 3.10 \quad (3)$$

式中, t 为温度($^{\circ}\text{C}$); u 为风速($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$),表征水与空气的相对速度,当水以高速喷出时,需结合水压、喷嘴直径和喷头形式等考虑水流和空气的相对速度; i 为日照强度($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)。

1.2 微生物气溶胶扩散系数

微生物气溶胶的扩散系数主要由评价点与排放源的相对位置和气象条件决定。具体的计算参考大气污染物扩散模型,如式(4)所示^[23]。

$$D = \frac{1}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x}{\sigma_y}\right)^2} \left[e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{z-H}{\sigma_z}\right)^2} + e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{z+H}{\sigma_z}\right)^2} \right] \quad (4)$$

式中, x 为评价点离排放源沿风向上的距离(m); y 为评价点离排放源垂直风向上的距离(m); z 为评价点离地高度(m); u 为风速($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); σ_y 为微生物气溶胶在垂直风向上的分布参数(m); σ_z 为微生物气溶胶在离地高度方向上的分布参数(m); H 为排放源高度(m)。

x 、 y 、 z 和 H 由现场测量确定,分布参数 σ_y 和 σ_z 的计算以及参数的选取参考文献[24]。

1.3 病原微生物衰减系数

不同的病原微生物在空气中的存活能力不同. 空气中病原微生物的衰减系数 R 可以按照式(5)计算^[22].

$$R = I \cdot e^{\lambda t} \tag{5}$$

式中, I 为环境影响因子(无量纲); λ 为病原微生物在空气中的衰减因子(s^{-1}); t 为气溶胶龄(s), 等于沿风向距离 x 比风速 u .

环境影响因子 I 和病原微生物衰减因子 λ 类似, 均是描述空气中病原微生物衰减速率的参数, 其中 I 表征的是环境对病原微生物的影响, 而 λ 主要是描述病原微生物自身随时间的变化. 每一种病原微生物的 I 和 λ 都需要通过具体的实验模拟来估算. 但是由于实验模拟的难度很大, 因此目前这方面的数据还非常缺乏. 表 1 和表 2^[22] 给出了空气中几

种典型微生物的 I 和 λ 的值及其分布情况.

计算病原微生物的衰减系数 R 时, 根据病原微生物的种类, 选择表 1 和表 2 中对应的或类似的微生物指标的参数值. 具体参数的选取, 一般根据环境条件, 选择 25% ~ 75% 区间的数值. 当环境条件比较适宜微生物生存, 如低的日照强度、温暖适宜的温度、高的湿度时, 选择靠近 75% 的值, 而强日照、高温或低温、低湿度时选择靠近 25% 的值. 对于 $I > 1$ 的情况可以理解为再生水雾化过程中, 这些微生物在气溶胶中存在聚集效应^[11]. 对于环境耐受能力较强的病原微生物以及无法估计衰减系数的病原微生物, 如隐孢子虫卵囊和贾第鞭毛虫孢囊等, 在风险评价中衰减系数 R 按 1 计算.

通过式(1)~(5)即可求得空气中病原微生物的浓度 c_{air} .

表 1 环境影响因子 I 的估计值及其分布^[22]
Table 1 Estimation values of environmental impact factor I

微生物指标	实验次数	环境影响因子 I 的分布情况 ¹⁾ /%						
		10	25	40	50	60	75	90
粪大肠菌群	13		0.068		0.13		0.58	
总大肠菌群	44	0.016	0.060	0.13	0.16	0.23	0.55	1.1
细菌总数	33	0.036	0.11	0.19	0.21	0.24	0.35	1.2
噬菌体	43	0.017	0.094	0.18	0.34	0.52	0.91	1.8
分枝杆菌	8		0.77		0.89		2.1	
产气荚膜杆菌	11		0.24		1.2		6.5	
肠链球菌	31	0.27	0.71	0.97	1.7	2.7	6.1	32
假单胞菌	13		1.7		14		73	

1) $n\%$ 表明实验所得结果中有 $n\%$ 低于表中给出的数值, 下同

表 2 微生物衰减因子 λ 的估计值及其分布^[22]
Table 2 Estimation values of microbial viability decay factor λ

微生物指标	实验次数	微生物衰减因子 λ 的分布情况/%						
		10	25	40	50	60	75	90
粪大肠菌群	13	-0.19	-0.070		-0.023		0	
总大肠菌群	44	-0.23	-0.094	-0.050	-0.032	-0.020	-0.004	0
细菌总数	33	-0.12	-0.020	-0.006	-0.004	0	0	
噬菌体	43	-0.11	-0.051	-0.029	-0.011	0	0	0
分枝杆菌	8	-0.15	-0.009		0		0	
产气荚膜杆菌	11	-0.10	-0.039		-0.004		0	0
肠链球菌	31	-0.06	-0.006	0	0	0	0	0
假单胞菌	13	-0.08	-0.008		0		0	

2 暴露剂量的计算

确定空气中病原微生物的浓度后, 呼吸途径的暴露剂量可按式(6)计算^[25].

$$N = c_{air} \cdot v \cdot t \tag{6}$$

式中, N 为呼吸途径的暴露剂量($mass$); c_{air} 为空气

中的病原微生物浓度($mass \cdot m^{-3}$); v 为呼吸速率($m^3 \cdot d^{-1}$ 或 $m^3 \cdot h^{-1}$); t 为暴露时间(d 或 h).

呼吸速率 v 应根据不同的再生水利用方式和易感人群确定, 可按日平均呼吸速率或小时平均呼吸速率 2 种方式计算. 一般情况下, 生活居住在受污染区域的易感人群的长期暴露剂量按照日平均呼吸速

率,只在某些特定活动方式下存在的短期暴露剂量以参考表 3 和表 4,或者查阅 US-EPA 的暴露因子手册^[25].暴露时间 t 需在现场针对不同的易感人群进

表 3 日平均呼吸速率参考值^[25]

易感人群年龄/a	< 1	1 ~ 2	3 ~ 5	6 ~ 8	9 ~ 11		12 ~ 14		15 ~ 18		> 19	
					男	女	男	女	男	女	男	女
空气吸入量/ $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$	4.5	6.8	8.3	10	14	13	15	12	17	12	15.2	11.3

表 4 小时平均呼吸速率参考值^{1)[25]}

易感人群	儿童					成人				
	睡眠	静坐	低	中	高	睡眠	静坐	低	中	高
空气吸入量/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	0.3	0.4	1.0	1.2	1.9	0.4	0.5	1.0	1.6	3.2

1) 低、中、高指易感人群的活动强度

行调查后确定.

3 结论

(1)呼吸吸入是再生水利用过程中病原微生物的主要暴露途径.本研究结合这一现状,基于再生水的雾化模型和空气污染物扩散模型,提出了由再生水雾化导致的呼吸途径病原微生物暴露剂量的一般计算方法.这一计算方法普遍适用于我国的污水再生利用健康风险定量评价工作.

(2)提出的方法考虑了再生水水质、再生水利用方式和利用规模、地理气象条件、病原微生物种类、易感人群等因素的差异,可直接用于计算再生水利用于农业灌溉、园林绿化以及水景喷泉过程中因再生水雾化导致的暴露剂量.在本方法基础上,建立微生物健康风险评价模型,可以研究各因子对最终风险值的影响.通过比较各因子的灵敏度,确定关键因子,寻求降低微生物健康风险的有效途径,从而为再生水的安全利用提供指导.

参考文献:

[1] Ottoson J, Hansen A, Westrell T, *et al.* Removal of Noro- and Enteroviruses, *Giardia* cysts, *Cryptosporidium* oocysts, and fecal indicators at four secondary wastewater treatment plants in Sweden [J]. *Water Environ Res*, 2006, **78**(8): 828-834.

[2] 宗祖胜, 胡洪营, 卢益新, 等. 某市贾第鞭毛虫和隐孢子虫污染现状[J]. *中国给水排水*, 2005, **21**(5): 44-46.

[3] 张彤. 污水再生处理过程中病原性原虫的去除特性研究[D]. 北京: 清华大学, 2006.

[4] 李梅, 胡洪营, 张薛, 等. 城市污水处理工艺对噬菌体的去除效果[J]. *环境科学*, 2006, **27**(1): 80-84.

[5] Pundsack J, Axler R, Hicks R, *et al.* Seasonal pathogen removal by alternative on-site wastewater treatment systems [J]. *Water Environ Res*, 2001, **73**(2): 204-212.

[6] Harwood V J, Levine A D, Scott T M, *et al.* Validity of the indicator organism paradigm for pathogen reduction in reclaimed water and public health protection [J]. *Appl Environ Microbiol*, 2005, **71**(6): 3163-3170.

[7] Rose J B, Dickson L J, Farrah S R, *et al.* Removal of pathogenic and indicator microorganisms by a full-scale water reclamation facility [J]. *Water Res*, 1996, **30**(11): 2785-2797.

[8] Ou W S, Lin Y F, Jing S R, *et al.* Performance of a constructed wetland-pond system for treatment and reuse of wastewater from campus buildings [J]. *Water Environ Res*, 2006, **78**(12): 2369-2376.

[9] Wang L S, Hu H Y, Wang C. Effect of ammonia nitrogen and dissolved organic matter fractions on the genotoxicity of wastewater effluent during chlorine disinfection [J]. *Environ Sci Technol*, 2007, **41**(1): 160-165.

[10] 郭美婷, 胡洪营, 李莉. 污水紫外线消毒工艺的影响因素研究[J]. *中国环境科学*, 2007, **27**(4): 534-538.

[11] WHO. Guidelines for the safe use of wastewater and excreta in agriculture: microbial risk assessment section [R]. 2001.

[12] Karra S, Katsivela E. Microorganisms in bioaerosol emissions from wastewater treatment plants during summer at a Mediterranean site [J]. *Water Res*, 2007, **41**: 1355-1365.

[13] Pascual L, Pérez-Luz S, Yáñez M A, *et al.* Bioaerosol emission from wastewater treatment plants [J]. *Aerobiologia*, 2003, **19**: 261-270.

[14] Bauer H, Fuerhacker M, Zibuschka F, *et al.* Bacteria and fungi in aerosols generated by two different types of wastewater treatment plants [J]. *Water Res*, 2002, **36**: 3965-3970.

[15] US-EPA. Guidelines for water reuse [M]. Washington DC, 2006.

[16] Asano T, Leong L Y C, Rigby M G, *et al.* Evaluation of the California wastewater reclamation criteria using enteric virus monitoring data [J]. *Water Sci Technol*, 1992, **26**(7-8): 1513-1524.

[17] Tanaka H, Asano T, Schroeder E D, *et al.* Estimating the safety of wastewater reclamation and reuse using enteric virus monitoring data [J]. *Water Environ Res*, 1998, **70**(1): 39-51.

[18] 仇付国, 王晓昌. 城市回用污水中病毒对人体健康风险的评

- 价[J]. 环境与健康杂志, 2003, **20**(4): 197-199.
- [19] Ryu H, Alum A, Mena K D, *et al.* Assessment of the risk of infection by *Cryptosporidium* and *Giardia* in non-potable reclaimed water [J]. *Water Sci Technol*, 2007, **55**(1-2): 283-290.
- [20] 何星海, 马世豪, 李安定, 等. 再生水利用健康风险暴露评价 [J]. *环境科学*, 2006, **27**(9): 1912-1915.
- [21] Eisenberg J N, Edmund Y W, Olivieri A W, *et al.* Quantifying water pathogen risk in an epidemiological framework [J]. *Risk Analysis*, 1996, **16**(4): 549-563.
- [22] Camann D E. A model for predicting dispersion of microorganisms in wastewater aerosols [A]. In: *Waste Water Aerosol and Disease* [C]. US-EPA, 1980.
- [23] 郝吉明, 马广大. 大气污染控制工程[M]. (第二版). 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [24] GB/T 3840-91, 制定地方大气污染物排放标准的技术方法[S].
- [25] US-EPA. Exposure factors handbook [M]. Washington DC, 1997.