

再生水利用健康风险暴露评价

何星海¹, 马世豪¹, 李安定¹, 潘小川², 陈清², 王静芬²

(1. 北京市环境保护科学研究院, 北京 100037; 2. 北京大学医学部, 北京 100083)

摘要: 结合北京市再生水利用工程, 建立了再生水用于公园绿化、道路降尘和冲洗作业时, 职业人群和公众的暴露评价方法和评价模型, 通过现场调研和监测分析, 首次提出了再生水利用暴露人群的再生水日摄入量和终生日均暴露剂量, 为健康危险度分析提供定量依据。其中公园绿化职业人群通过皮肤和吸入的日均总摄入量为 0.07L/d, 公众为 0.04~0.05L/d, 消毒副产物的日均暴露剂量为: 职业人群经呼吸途径终生日均暴露剂量为 $2.8 \times 10^{-7} \sim 1.2 \times 10^{-5} \text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$, 经皮肤渗入途径终生日均暴露剂量为 $5.8 \times 10^{-8} \sim 2.4 \times 10^{-6} \text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$; 公众经呼吸途径终生日均暴露剂量为 $1.1 \times 10^{-7} \sim 6.8 \times 10^{-6} \text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ 。

关键词: 再生水; 公园绿化; 道路降尘和冲洗; 暴露评价; 健康风险评价

中图分类号: X820.4; X651 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2006)09-1912-04

Exposure Assessment of Various Reclaimed Water Uses

HE Xing-hai¹, MA Shi-hao¹, LI An-ding¹, PAN Xiao-chuan², CHEN Qing², WANG Jing-fen²

(1. Beijing Municipal Research Academy of Environmental Protection, Beijing 100037, China; 2. Health Science Center, Peking University, Beijing 100083, China)

Abstract: The exposure assessment method and model of various reclaimed water uses are built combining with Beijing reclaimed water project. Firstly the daily ingesting dose and lifetime average daily dose (LADD) of exposure people are provided via field work and monitoring analysis, which could be used in health risk assessment as quantitative reference. Take park irrigation as a example, for occupational workers, the total daily ingesting dose is 0.07L/d, LADD of disinfection by-products (DBPs) via the respiratory route is $2.8 \times 10^{-7} \sim 1.2 \times 10^{-5} \text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$, LADD of DBPs via the dermal route is $5.8 \times 10^{-8} \sim 2.4 \times 10^{-6} \text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$. For common people, the total daily ingesting dose is 0.04~0.05 L/d, LADD of DBPs via the respiratory route is $1.1 \times 10^{-7} \sim 6.8 \times 10^{-6} \text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$.

Key words: reclaimed water; park irrigation; street watering and rinse; exposure assessment; health risk assessment

随着再生水利用规模和应用范围的不断扩大, 其健康风险受到国内外的广泛关注, 健康风险评价方法也开始应用于再生水利用的健康风险评估中。健康风险评价方法的评价程序一般采用 4 步法^[1], 即危害鉴定、暴露评价、剂量反应关系评价和风险表征。在进行健康风险评价时, 有关剂量反应关系的评价模型等资料数据一般可在国际公认的数据库(如美国的 IRIS 综合信息系统)中查到, 而暴露评价^[2]则需结合具体事件和人群暴露的具体情况, 调查研究暴露人群的特征、暴露环境介质中的有害因子的强度、暴露时间和频率, 估算或预测有害物质的暴露过程和暴露量。因此, 暴露评价是再生水利用健康风险评价的关键。

国外文献[3]关于不同回用途径再生水利用暴露评价的报道为数不多, 目前尚未见针对我国再生水利用特点的暴露数据资料的报道。本文主要是结合北京市某再生水回用工程, 对再生水用于公园绿化和道路降尘、冲洗的暴露评价进行了研究, 建立再生水利用暴露评价模型及参数, 为再生水利用的健

康风险评价提供定量依据。

1 暴露评价的基本概念

在健康风险评价中, 所谓暴露是指人体暴露在环境中对某有害因子(化学因子、物理因子和病原体等)的接触和吸收。暴露剂量的大小可通过测定或估算人体与环境介质在某一特定时期交换界面(即肺、胃肠和皮肤)与某种介质的接触时间、接触量和有害因子的浓度来确定。本文中暴露是指再生水利用环境中再生水中有害因子与人体界面(主要是通过吸入、皮肤渗入)的接触和吸收。

暴露剂量是进行健康风险定量评价的依据。暴露剂量^[4]可分为: 潜在剂量(Potential Dose), 应用剂量(Applied Dose), 内部(吸收)剂量[Internal (Absorbed) Dose], 送达剂量(Delivered Dose)。由于

收稿日期: 2005-09-03; 修订日期: 2005-12-08

基金项目: 北京市自然科学基金重点项目(8011001)

作者简介: 何星海(1964~), 女, 硕士, 副研究员, 主要研究方向为水环境标准、再生水利用健康风险, E-mail: hexinghai2006@163.com

应用剂量、内部(吸收)剂量和送达剂量难以测定,因此在实际暴露评价过程中,一般应用潜在剂量进行评价,本文中的暴露剂量指潜在剂量。

2 再生水利用暴露评价模型

2.1 日暴露剂量评价模型

再生水用于绿化、道路降尘与冲洗等用途时,再生水中的有害因子主要通过以下 2 个途径与职业人员或公众接触:

(1) 再生水在利用过程中,部分再生水被雾化,形成气溶胶,通过呼吸吸入人体内,即有害因子转化过程为:再生水-雾化-吸入。

(2) 再生水在利用过程中,职业人员或公众与再生水直接接触,通过皮肤渗入体内,即再生水-皮肤渗入。

如果将再生水利用过程中,1d 之内通过呼吸途径吸入的再生水量和经皮肤接触途径渗入的再生水量统称为日摄入量,并以 V 表示,则再生水用于绿化、道路降尘与冲洗的日暴露剂量(D),可用以下公式计算:

$$D = c_{wi} \cdot V \quad (1)$$

式中, D : 某种暴露途径某种有害因子的日暴露剂量,mg/d; c_{wi} : 再生水中某种有害因子浓度,mg/L; V : 某种暴露途径日暴露再生水摄入量,L/d。

不同暴露途径再生水日摄入量 V 的计算是不同的,计算公式分别为:

对于呼吸途径:

$$V_{吸入} = IR \cdot ET_{吸入} \cdot F \times 0.63 \quad (2)$$

式中, $V_{吸入}$: 经呼吸途径再生水日摄入量,L/d; IR : 呼吸速率,m³/h; $ET_{吸入}$: 呼吸途径日暴露时间,h/d; F : 空气中再生水水雾浓度(即单位空气中所含再生水形成的水雾量,水/空气),L/m³; 0.63 为吸收率。

对于皮肤接触渗入途径:

$$V_{皮肤} = S_A \cdot P_C \cdot ET_{皮肤} \times 10^3 \quad (3)$$

式中, $V_{皮肤}$: 经皮肤渗入途径再生水日摄入量,L/d; S_A : 接触再生水皮肤表面积,m²; P_C : 皮肤渗透速率,m/h; $ET_{皮肤}$: 皮肤渗入途径日暴露时间,h/d。

将式(2)和式(3)代入式(1),则再生水用于绿化、道路降尘与冲洗日暴露剂量的计算公式分别为:

$$\begin{aligned} D_{吸入} &= c_{wi} \cdot V_{吸入} \\ &= c_{wi} \cdot IR \cdot ET_{吸入} \cdot F \times 0.63 \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} D_{皮肤} &= c_{wi} \cdot V_{皮肤} \\ &= c_{wi} \cdot S_A \cdot P_C \cdot ET_{皮肤} \times 10^3 \end{aligned} \quad (5)$$

式中, $D_{吸入}$: 经呼吸途径某有害因子的日暴露剂量,mg/d; $D_{皮肤}$: 经皮肤渗入途径某有害因子的日暴露剂量,mg/d。

2.2 终生日均暴露剂量评价模型

根据 $D_{吸入}$ 和 $D_{皮肤}$ 计算,再生水用于绿化、道路降尘与冲洗用途的终生日均暴露剂量的计算公式如下:

$$LADD_{吸入} = D_{吸入} \cdot ED / (BW \cdot LT) \quad (6)$$

$$LADD_{皮肤} = D_{皮肤} \cdot ED / (BW \cdot LT) \quad (7)$$

式中, $LADD_{吸入}$: 经呼吸途径终生日均暴露剂量,mg/(kg·d); $LADD_{皮肤}$: 经皮肤渗入途径终生日均暴露剂量,mg/(kg·d); ED : 终生暴露天数,d; BW : 平均体重,kg(本研究取北京市成人平均体重 64.25kg); LT : 预期寿命,以平均寿命计,d(本研究取北京市平均寿命 74.38 × 365d)。

公式(1)~(7)中, IR 、 S_A 、 P_C 、 BW 、 LT 等参数都可以通过有关文献^[5]确定,再生水中污染因子的浓度(c_{wi})可通过水质监测予以确定。因此,本暴露评价研究的重点是调查确定职业人员和公众在再生水环境中的日暴露时间(ET)、终生暴露天数(ED)和作业现场空气中再生水水雾浓度(F),估算人群暴露于再生水环境中对再生水的日摄入量(V),再根据再生水中污染因子的浓度,便可计算出不同污染因子的日暴露剂量(D)和终生日均暴露剂量($LADD$)。

3 再生水作为绿化用水、道路降尘和冲洗用水的暴露评价

以使用再生水进行绿化的某公园作为公园绿化暴露评价的对象,以使用再生水作业的某清扫公司和其作业路段之一的某大街作为道路降尘和冲洗暴露评价的对象,采用现场调查和问卷调查相结合的方法对职业人员和公众进行暴露评价。

3.1 日暴露时间(ET)和终生暴露天数(ED)

3.1.1 再生水用于公园绿化

职业人群: 对公园绿化职业人员作业和接触再生水情况进行了调查。除一般情况调查(包括年龄、性别、文化程度等),健康状况调查,职业接触史调查,职业卫生知识调查外,重点调查了作业期间再生水接触情况、接触时间、再生水用量等参数。通过统计计算得出职业人群的暴露参数,见表 1。

公众: 分别对游客的人数、人群特征、滞留时间、来园频率等情况进行了现场和问卷调查。经统计得出暴露参数见表 1。

表 1 再生水用于公园绿化暴露参数

Table 1 Exposure parameter of reclaimed water in park irrigation

人群	$ET/h \cdot d^{-1}$			ED/d
	$ET_{\text{皮肤}}$	$ET_{\text{吸入(现场)}}$	$ET_{\text{吸入(非现场)}}$	
职业 方案 1	0.33	0.67	2.33	2 790
人群 方案 2	0.33	0.67	2.33	3 255
中青年游客	0	0	2.5	2 790
老年游客	0	0	3	1 395

表 1 中, 评价方案 1 和 2 为假定的 2 种职业人群评价方案. 方案 1: 现园艺工人工作(平均年龄 25 岁)至退休从事园林绿化工作(按 55 岁退休计)暴露于再生水中的时间为 30a; 方案 2: 园艺工人从开始工作(按 20 岁计)到退休始终从事道路降尘工作, 暴露于再生水中的时间为 35a. 中青年和老年游客终

生暴露年限分别按 30a 和 15a 计.

3.1.2 再生水用于道路降尘和冲洗

职业人群: 采用问卷的调查方式对职业人员(某清扫公司司机)的基本情况、作业情况进行了调查, 结合现场作业调查情况, 得出道路降尘和冲洗职业人群的暴露参数, 见表 2.

公众: 以某大街路段为试点, 对降尘作业公众暴露情况进行了调查, 包括: 临街店铺、岗亭工作人员(简称临街工作人员)和行人. 调查统计结果看, 路边行人所占比例较大, 临街工作人员位置固定, 暴露时间较长, 工作场所距离降尘工作路面较近, 其暴露参数见表 2. 由于道路冲洗作业在晚间 23:00 以后进行, 这个时间段路上公众很少, 其暴露可忽略不计.

表 2 中, 评价方案 1 和 2 为假定的 2 种职业人

表 2 再生水道路降尘和冲洗暴露参数

Table 2 Exposure parameter of reclaimed water in road watering and rinse

参数	道路降尘				道路冲洗	
	职业		公众		职业	
	方案 1	方案 2	行人	临街工作人员	方案 1	方案 2
$ET_{\text{吸入}}/h \cdot d^{-1}$	3	3	0.33	1	2	2
$ET_{\text{皮肤}}/h \cdot d^{-1}$	0.5	0.5	0	0	1	1
ED/d	1 950	5 250	6 300	6 300	1 950	5 250

群评价方案. 方案 1: 现在岗司机(平均年龄 42 岁)工作至退休一直从事道路降尘工作(按 55 岁退休计), 暴露于再生水中的时间为 13a; 方案 2: 司机(按 20 岁计)从开始工作到退休始终从事道路降尘工作, 暴露于再生水中的时间为 35a. 公众终生暴露年限按 30a 计.

3.2 公园绿化、道路降尘和冲洗作业场所再生水水雾浓度(F)

通过调研确定北京地区喷灌作业时水的雾化系数和公园浇灌绿地的喷灌强度等基本数据, 建立了公园绿化再生水水雾浓度估算模型, 由模型计算得出了喷灌现场的水雾浓度($F_{\text{绿化(现场)}}$, 水/空气)为 0.033 L/m^3 , 非喷灌现场的水雾浓度($F_{\text{绿化(非现场)}}$, 水/空气)为 0.0167 L/m^3 .

根据道路降尘作业利用再生水的用水量、作业路面长度和路面喷洒宽度等基本数据, 建立了道路降尘再生水水雾浓度估算模型, 由模型得出职业人员接触的再生水水雾浓度($F_{\text{降尘(职业)}}$, 水/空气)为 0.027 L/m^3 , 非职业人员接触的再生水水雾浓度($F_{\text{降尘(非职业)}}$, 水/空气)为 0.033 L/m^3 .

同样, 根据北京地区日均蒸发量等参数, 建立了道路冲洗再生水水雾浓度估算模型, 由模型得出冲洗路面再生水水雾浓度($F_{\text{冲洗}}$)为 0.0127 L/m^3 .

3.3 再生水日摄入量(V)

将不同用途的 ET 带入公式(2)和(3)进行计算, 可得出不同途径职业人员和公众再生水日摄入量, 结果见表 3.

3.4 终生日均暴露剂量($LADD$)

表 3 再生水的日摄入量/ $L \cdot d^{-1}$

Table 3 Daily ingestion volume of reclaimed water/ $L \cdot d^{-1}$

摄入量	公园绿化			道路降尘			道路冲洗
	职业	中青年	老年	职业	商场工作人员	行人	职业
$V_{\text{吸入}}$	0.058	0.04	0.05	0.077	0.031	0.010	0.024
$V_{\text{皮肤}}$	0.012	0	0	0.018	0	0	0.036
$V_{\text{总}}$	0.07	0.04	0.05	0.095	0.031	0.010	0.060

将再生水中各污染物的监测浓度(c_w)和 ET 、 ED 带入公式(6)和(7)进行计算,得出职业人员和公众再生水终生日均暴露剂量($LADD$).表 4~ 表 6 列

举了本研究对再生水用于公园绿化、道路降尘和冲洗时消毒副产物主要包括氯仿、一溴二氯甲烷、二溴一氯甲烷和溴仿的终生日均暴露剂量的评价结果.

表 4 公园绿化暴露人群终生日均暴露剂量¹⁾/mg•(kg•d)⁻¹
Table 4 $LADD$ of exposure people in park irrigation/mg•(kg•d)⁻¹

污染物	c_w /mg•L ⁻¹	职业人群				公众	
		$LADD$ 吸入		$LADD$ 皮肤		$LADD$ 吸入	
		方案 1	方案 2	方案 1	方案 2	中青年	老年
氯仿	0.108	9.961 32E-06	1.162 15E-05	2.052 21E-06	2.394 25E-06	6.815 44E-06	4.089 27E-06
一溴二氯甲烷	0.011	1.014 58E-06	1.183 68E-06	2.090 22E-07	2.438 59E-07	6.941 65E-07	4.164 99E-07
二溴一氯甲烷	0.005 82	5.368 04E-07	6.262 72E-07	1.105 91E-07	1.290 23E-07	3.672 77E-07	2.203 66E-07
溴仿	0.003 04	2.803 93E-07	3.271 25E-07	5.776 6E-08	6.739 36E-08	1.918 42E-07	1.151 05E-07

1) 评价浓度(c_w)以监测浓度的最大值计

表 5 道路降尘暴露人群终生日均暴露剂量/mg•(kg•d)⁻¹
Table 5 $LADD$ of exposure people in road watering/mg•(kg•d)⁻¹

污染物	职业人群				公众	
	$LADD$ 吸入		$LADD$ 皮肤		$LADD$ 吸入	
	方案 1	方案 2	方案 1	方案 2	行人	临街工作人员
氯仿	9.241 72E-06	2.488 16E-05	2.173 25E-06	5.851 04E-06	4.014 23E-06	1.216 43E-05
一溴二氯甲烷	9.412 87E-07	2.534 23E-06	2.213 49E-07	5.959 4E-07	4.088 56E-07	1.238 96E-06
二溴一氯甲烷	4.980 26E-07	1.340 84E-06	1.171 14E-07	3.153 06E-07	2.163 22E-07	6.555 22E-07
溴仿	2.601 37E-07	7.003 7E-07	6.117 28E-08	1.646 96E-07	1.129 93E-07	3.424 03E-07

表 6 道路冲洗职业人群终生日均暴露剂量/mg•(kg•d)⁻¹
Table 6 $LADD$ of occupational workers in road rinse/mg•(kg•d)⁻¹

污染物	$LADD$ 吸入		$LADD$ 皮肤	
	方案 1	方案 2	方案 1	方案 2
氯仿	2.898 02E-06	7.802 37E-06	4.346 49E-06	1.170 21E-05
一溴二氯甲烷	2.951 69E-07	7.946 86E-07	4.426 98E-07	1.191 88E-06
二溴一氯甲烷	1.561 71E-07	4.204 61E-07	2.342 28E-07	6.306 13E-07
溴仿	8.157 4E-08	2.196 22E-07	1.223 46E-07	3.293 92E-07

4 结论

(1) 首次对再生水用于公园绿化和道路降尘、冲洗的职业人员和公众的暴露进行了研究,建立了再生水利用健康风险暴露评价模型和方法.

(2) 公园绿化暴露评价表明:职业人员和公众年暴露天数为 93d/a,职业人员再生水日摄入量为 0.07L/d,中青年游客为 0.04L/d,老年游客为 0.05L/d.道路降尘暴露评价表明:职业人员年暴露天数为 150d/a,再生水日摄入量为 0.095L/d,公众年暴露天数皆为 210d/a,临街工作人员再生水日摄入量为 0.031L/d,行人为 0.010L/d.道路冲洗暴露评价表明:职业人员年暴露天数为 150d/a,再生水日摄入量为 0.06L/d.

(3) 对消毒副产物的终生日均暴露剂量计算表明:公园绿化和道路降尘与冲洗的职业人群经呼吸途径终生日均暴露剂量为 $8.2 \times 10^{-8} \sim 2.5 \times 10^{-5}$

mg/(kg•d),经皮肤渗入途径终生日均暴露剂量为 $5.8 \times 10^{-8} \sim 1.2 \times 10^{-5}$ mg/(kg•d);公众经呼吸途径终生日均暴露剂量为 $1.1 \times 10^{-7} \sim 1.2 \times 10^{-5}$ mg/(kg•d).

参考文献:

[1] WHO. Environmental Health Criteria 210: Principles for the assessment of risks to human health from exposure to chemicals [M]. London: IWA Publishing, 2000.
[2] Ott W R. Concepts of human exposure assessment to air pollution[J]. Environment International, 1982, (7): 179 ~ 196.
[3] Florida Department of Environmental Protection. Risk Impact Statement. Phase II Revisions to Chapter 62-610, F. A. C[R]. Docket No. 95-08R. December 21, 1998.
[4] US EPA. Guidelines for Exposure Assessment [R]. Washington, DC: FRL-4129-5. 1992.
[5] US EPA. Exposure Factors Hand Book[R]. Washington, DC. EPA/ 600/ P-95/ 002Fa. 1997.