

再生水道路降尘化学污染物的健康风险评价研究

何星海¹, 马世豪¹, 潘小川², 陈清², 李安定¹, 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: 利用健康风险评价的方法, 以北京市某再生水利用工程为依托, 对再生水用于道路降尘时接触人群的暴露水平和健康风险进行了调查和实验研究, 建立了再生水用于道路降尘的健康风险评价模型, 提出了再生水对职业人群和公众的暴露参数, 对再生水中氯仿等 19 种主要污染物的健康风险进行了定量评价, 结果表明, 再生水用于道路降尘职业人群致癌的总危险度为 8.47×10^{-6} ; 非职业人群致癌的总危险度为 3.78×10^{-6} .

关键词: 再生水; 道路降尘; 健康风险评价; 暴露剂量

中图分类号: X820.4; X651 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2007)06-1290-05

Research on the Health Risk Assessment of Chemical Pollutants in Reclaimed Water Used for Streets Watering

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

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

Abstract: It is the first time for this research to utilize the method of health risk assessment. Combining with Beijing reclaimed water project, the exposure dose level and health risk to contact people are investigated and studied. The risk assessment model is built, and the exposure parameters of occupational workers and common people are provided, when reclaimed water was used for streets watering. The health risks of 19 main chemical pollutants in reclaimed water are evaluated quantificationally. The results show that the total risk caused by carcinogens is 8.47×10^{-6} for occupational workers and 3.78×10^{-6} for common people.

Key words: reclaimed water; streets watering; health risk assessment; exposure dose

洒水降尘是北京市控制扬尘、提高空气质量的举措之一。随着水资源的短缺, 2001 年起北京市开始使用城市污水再生水进行道路降尘。目前北京市的二环路、三环路、长安街及城市的主要干道, 共计 98 个地段, 已有近 1/3 的地段使用再生水, 年再生水使用量 30 万 m^3 , 计划到 2007 年北京市道路降尘将全面使用再生水。由于城市污水来源广泛、成分复杂, 且再生水用于道路降尘过程中, 工作人员和公众将与再生水发生密切接触, 经污水处理厂和再生水厂处理后的再生水用于道路降尘能否造成健康危害, 一直是人们关注的焦点。

本研究采用国际公认健康风险评价四步法^[1], 即危害鉴定、暴露评价、剂量-反应关系分析、风险表征, 以北京市某城市污水再生水利用工程为依托, 结合北京市道路降尘的作业方式, 对北京市再生水道路降尘化学污染物的健康风险进行了定量评价。

1 再生水中有害化学污染物的分析与鉴定

为确定再生水中主要有害化学污染物, 首先采用 GC-MS 对有机物进行了定性分析, 根据定性分析的结果, 并结合再生水来源分析, 对 54 种挥发性有

机物、目前常见的 11 种有机氯、有机磷农药、水质标准中经常控制的 10 种重金属进行了定量分析。根据多次定量分析结果, 选择再生水中检出率较高, 浓度较大, 对健康危害较大(致癌、环境激素类污染物、国际禁用), 可能经皮肤接触渗入或经空气吸入的污染物确定为再生水的主要有害化学污染物。确定的污染物清单及其监测浓度范围见表 1。

2 再生水用于道路降尘的暴露评价

2.1 暴露评价模型

再生水用于道路降尘过程中, 再生水中的有害化学污染物主要通过以下 2 个途径与职业人员或公众接触: ①部分再生水被雾化, 形成气溶胶, 通过呼吸吸入人体内; ②职业人员或公众与再生水直接接触, 通过皮肤接触渗入体内。

(1) 呼吸途径终生日均暴露剂量的估算

$$LADD_{\text{吸入}}^{\text{I}} = c_{\text{wi}} \times IR \times ET_{\text{吸入}} \times$$

收稿日期: 2006-06-03; 修订日期: 2006-08-01

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研究等, E-mail: hexinghai2006@163.com

表 1 再生水中有害化学污染物清单

Table 1 List of toxic chemical pollutants in reclaimed water						
污染物		致癌 ¹⁾ 物类别	激素类 污染物	挥发性 物质	经皮肤 接触渗入	国际禁用 (POPs)
有机物	氯仿	B2		+		0.857 ~ 108
	一溴二氯甲烷	B2				0.06 ~ 11.0
	二溴一氯甲烷	C				0 ~ 5.82
	溴仿	B2				0 ~ 3.04
	四氯化碳	B2		+	+	0 ~ 0.09
	二氯甲烷	B2				0 ~ > 100
	1,2-二氯乙烷	B2				43
	苯	A		+	+	0 ~ 31.84
	甲苯	D				0 ~ 0.73
	乙苯	D				0.03 ~ 1.2
	二甲苯					0.03 ~ 4.0
农药	DDT	B2	+			< 0.064
	666	B2				< 0.028
	六氯苯	B2	+		+	< 2.1
重金属	砷	A				0.512 ~ 2
	镉	B1				0 ~ 5.1
	铬(Ⅵ)	A				0 ~ 10
	汞	D		+	+	0 ~ 0.2
	镍					0 ~ 129

1) 美国 EPA 将致癌物分为 5 类^[2]: A 类为人类致癌物; B 类为很可能人类致癌物, 其中 B1 为人类资料为“证据有限”但动物资料为“致癌证据充分”, B2 为动物“致癌证据充分”但人类资料“无”或“不足”; C 类为可能人类致癌物; D 类为不能确定是否为人类致癌物; E 类为对人类致癌性无证据

$$F \times 0.63 \times ED / (BW \times LT) \tag{1}$$

$$\begin{aligned} LADD_{吸入}^2 &= c_{wi} \times ET_{吸入} \times ED \times F \\ &\times 0.63 / (24 \times LT) \end{aligned} \tag{2}$$

式中, $LADD_{吸入}^1$: 某化学污染物经呼吸途径终生日均暴露剂量, $mg/(kg \cdot d)$; c_{wi} : 再生水中某种化学污染物浓度, mg/L ; IR : 呼吸速率, m^3/h , (室外中等活动 $1.5 m^3/h$ ^[3]); $ET_{吸入}$: 吸入日暴露时间, h/d ; F : 道路降尘过程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, L/m^3); 0.63 : 吸收系数; ED : 终生暴露天数, d ; BW : 平均体重, kg , 取北京市人均体重 $64.25 kg$ ^[4]; LT : 预期寿命, 一般以平均寿命计, d , 取北京市平均寿命 $74.38 \times 365 d$ ^[4]; $LADD_{吸入}^2$: 某化学污染物经呼吸途径终生日均暴露浓度, mg/m^3 .

(2) 皮肤渗入途径终生日均暴露剂量的估算

$$\begin{aligned} LADD_{皮肤} &= c_{wi} \times S_A \times P_C \times ET_{皮肤} \\ &\times 10^3 \times ED / (BW \times LT) \end{aligned} \tag{3}$$

式中, $LADD_{皮肤}$: 某化学污染物经皮肤渗入途径终生

日均暴露剂量, $mg/(kg \cdot d)$; S_A : 皮肤表面接触再生水面积, m^2 , (只考虑手背手掌面积, 取 $0.018 m^2$); P_C : 化学物质皮肤渗透系数, m/h , 取 $0.002 0 m/h$; $ET_{皮肤}$: 皮肤日暴露时间, h/d ; 其它同上.

从公式(1)~(3)可知, 只要确定了道路降尘过程中不同暴露途径的暴露参数 ET 、 ED 、 F , 便可估算出暴露剂量.

2.2 暴露参数的确定

采用现场和问卷调查的方法, 对北京市利用再生水进行道路降尘的作业范围、作业规程、喷洒量等进行了调查; 对道路降尘现场人群暴露特征进行了分析与评价^[5]. 结果表明暴露人群主要有 2 类, 一类为职业人群, 即清洗车驾驶员; 另一类为非职业人群, 即作业路段周边的公众, 主要是临街工作人员和路边行人 2 类人群, 不同暴露人群的暴露参数见表 2.

2.3 暴露评价结果

暴露评价结果见表 3.

表 2 道路降尘暴露参数

Table 2 Exposure parameter for reclaimed water in streets watering					
暴露人群	$F/L \cdot m^{-3}$	日吸入暴露 时间/ $h \cdot d^{-1}$	日皮肤暴露 时间/ $h \cdot d^{-1}$	年持续暴露 时间/ $d \cdot a^{-1}$	终身暴露 年限/ a
职业人员(工作 35 a)	0.027	3	0.5	150	35
行人	0.033	0.33	0	210	30
临街工作人员	0.033	1	0	210	30

表 3 道路降尘暴露人群终生日均暴露剂量和终生日均暴露浓度¹⁾

Table 3 Lifetime average daily doses and concentrations of exposure people in streets watering							
污染物	职业人群			非职业人群			
	吸入途径		皮肤途径	吸入途径			
	终生日均暴露浓度	终生日均暴露剂量	终生日均暴露剂量	终生日均暴露浓度/mg•m ⁻³		终生日均暴露剂量/mg•(kg•d) ⁻¹	
	/mg•m ⁻³	/mg•(kg•d) ⁻¹	/mg•(kg•d) ⁻¹	行人	临街工作人员	行人	临街工作人员
氯仿	4.440 67E-05	2.488 16E-05	5.851 04E-06	7.164 28E-06	2.170 99E-05	4.014 23E-06	1.216 43E-05
一溴二氯甲烷	4.522 9E-06	2.534 23E-06	5.959 4E-07	7.296 95E-07	2.211 2E-06	4.088 56E-07	1.238 96E-06
二溴一氯甲烷	2.393 03E-06	1.340 84E-06	3.153 06E-07	3.860 75E-07	1.169 92E-06	2.163 22E-07	6.555 22E-07
溴仿	1.249 97E-06	7.003 7E-07	1.646 96E-07	2.016 61E-07	6.110 94E-07	1.129 93E-07	3.424 03E-07
四氯化碳	3.700 56E-08	2.073 46E-08	4.875 87E-09	5.970 23E-09	1.809 16E-08	3.345 19E-09	1.013 69E-08
二氯甲烷	4.111 73E-05	2.303 85E-05	5.417 63E-06	6.633 59E-06	2.010 18E-05	3.716 88E-06	1.126 33E-05
1,2-二氯乙烷	1.768 04E-05	9.906 55E-06	2.329 58E-06	2.852 44E-06	8.643 77E-06	1.598 26E-06	4.843 2E-06
苯	1.309 17E-05	7.335 45E-06	1.724 97E-06	2.112 14E-06	6.400 41E-06	1.183 45E-06	3.586 22E-06
甲苯	3.001 56E-07	1.681 81E-07	3.954 87E-08	4.842 52E-08	1.467 43E-07	2.713 32E-08	8.222 18E-08
乙苯	4.934 08E-07	2.764 62E-07	6.501 16E-08	7.960 31E-08	2.412 21E-07	4.460 25E-08	1.351 59E-07
二甲苯	1.644 69E-06	9.215 39E-07	2.167 05E-07	2.653 44E-07	8.040 72E-07	1.486 75E-07	4.505 3E-07
DDT	1.315 75E-08	7.372 32E-09	1.733 64E-09	2.122 75E-09	6.432 57E-09	1.189 4E-09	3.604 24E-09
六六六	5.756 42E-09	3.225 39E-09	7.584 69E-10	9.287 03E-10	2.814 25E-09	5.203 63E-10	1.57686E-09
六氯苯	4.317 32E-07	2.419 04E-07	5.688 52E-08	6.965 27E-08	2.110 69E-07	3.902 72E-08	1.182 64E-07
砷	8.223 46E-08	4.607 7E-08	1.083 53E-07	1.326 72E-08	4.020 36E-08	7.433 75E-09	2.252 65E-08
镉	2.096 98E-07	1.174 96E-07	2.762 99E-07	3.383 13E-08	1.025 19E-07	1.895 61E-08	5.744 26E-08
铬(VI)	4.111 73E-07	2.303 85E-07	5.417 63E-07	6.633 59E-08	2.010 18E-07	3.716 88E-08	1.126 33E-07
汞	8.223 46E-09	4.607 7E-09	1.083 53E-08	1.326 72E-09	4.020 36E-09	7.433 75E-10	2.252 65E-09
镍	5.304 13E-06	2.971 96E-06	6.988 75E-06	8.557 33E-07	2.593 13E-06	4.794 77E-07	1.452 96E-06

1)非职业人员皮肤暴露均忽略不计

3 剂量反应关系

USEPA 对化学物质的人体健康风险研究较为充分,并已建立了综合风险信息系

统,该系统对某一化学物质给出了对人体健康影响的定性描述和定量评价.本文非致癌及致癌的剂量反应关系所引用的

表 4 剂量-反应关系

Table 4 Dose-response of various chemicals					
化合物	危害鉴定	RfD (参考剂量)		斜率系数	空气单位危险度
		经口途径	吸入途径	经口途径	吸入途径
		/mg•(kg•d) ⁻¹	/mg•m ⁻³	/[mg•(kg•d) ⁻¹] ⁻¹	/(mg•m ⁻³) ⁻¹
氯仿	B2	0.01	—	1×10 ⁻²	2.3×10 ⁻²
一溴二氯甲烷	B2	2×10 ⁻²	—	6.2×10 ⁻²	—
二溴一氯甲烷	C	2×10 ⁻²	—	8.4×10 ⁻²	—
溴仿	B2	2×10 ⁻²	—	7.9×10 ⁻³	1.1×10 ⁻³
四氯化碳	B2	7×10 ⁻⁴	—	1.3×10 ⁻¹	1.5×10 ⁻²
二氯甲烷	B2	6×10 ⁻²	—	7.5×10 ⁻³	4.7×10 ⁻⁴
1,2-二氯乙烷	B2	9×10 ⁻³	9×10 ⁻³	9.1×10 ⁻²	2.6×10 ⁻²
苯	A	4.0×10 ⁻³	3×10 ⁻²	5.5×10 ⁻²	7.8×10 ⁻³
甲苯	D	2×10 ⁻¹	4×10 ⁻¹	—	—
乙苯	D	1×10 ⁻¹	1	—	—
二甲苯	—	0.2	0.1	—	—
DDT	B2	5×10 ⁻⁴	—	3.4×10 ⁻¹	9.7×10 ⁻²
六六六	B2	—	—	1.8	5.1×10 ⁻¹
六氯苯	B2	8×10 ⁻⁴	—	1.6	4.6×10 ⁻¹
砷	A	3.4×10 ⁻⁴	—	1.5	4.3
镉	B1	5×10 ⁻⁴	—	—	1.8
铬(VI)	吸入: A 口入: D	3×10 ⁻³ (水)	8×10 ⁻⁶ (气溶)	—	12
汞	D	—	3×10 ⁻⁴	—	—
总镍	—	2×10 ⁻²	—	—	—

数据为美国 IRIS 数据库中数据^[6],见表 4.

4 危险度特征分析

4.1 危险度计算公式

(1)人群终生致癌危险度的计算公式

$$R_i = LADD_i \times PF_i \tag{4}$$

式中, R_i : 终生致癌危险度; $LADD_i$: 终生日均暴露剂量或终生日均暴露浓度, $\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$ 或 mg/m^3 ; PF_i : 致癌强度系数, $[\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}]^{-1}$ 或 $(\text{mg}\cdot\text{m}^{-3})^{-1}$.

(2)人群终生非致癌危险度的计算公式

$$R_i^1 = (LADD_i/\text{RfD}_i) \times 10^{-6} \tag{5}$$

式中, R_i^1 : 发生某种健康危害的终生危险度; RfD_i : 某化学污染物的参考剂量, $\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$ 或 mg/m^3 ; 10^{-6} : 与 RfD 相应的可接受危险度.

(3) 人群终生总危险度的计算公式

$$R_t = \sum R_i$$

式中, R_i 表示不同毒物的终生健康危险度(致癌与非致癌分别计算)

4.2 健康危险度评价结果

再生水用于道路降尘,职业人群和非职业人群的致癌危险度与非致癌危险度的评价结果见表 5~8.

表 5 职业人群道路降尘致癌危险度评价结果¹⁾

Table 5 Health risks of occupational workers caused by carcinogens				
	污染物	吸入途径	皮肤途径	危险度
消毒副产物	氯仿	1.02E-06	5.85E-08	1.08E-06
	一溴二氯甲烷	1.57E-07*	3.69E-08	1.94E-07
	二溴一氯甲烷	1.13E-07*	2.65E-08	1.39E-07
	溴仿	1.37E-09	1.30E-09	2.68E-09
挥发性有机物	四氯化碳	5.55E-10	6.34E-10	1.19E-09
	二氯甲烷	1.93E-08	4.06E-08	6.00E-08
	1,2-二氯乙烷	4.60E-07	2.12E-07	6.72E-07
	苯	1.02E-07	9.49E-08	1.97E-07
	DDT	1.28E-09	5.89E-10	1.87E-09
农药	六六六	2.94E-09	1.37E-09	4.30E-09
	六氯苯	1.99E-07	9.10E-08	2.90E-07
	砷	3.54E-07	1.63E-07	5.17E-07
重金属	镉	3.77E-07	—	3.77E-07
	铬(VI)	4.93E-06	—	4.93E-06
	总危险度	7.74E-06	7.27E-07	8.47E-06

1) 吸入致癌危险度评价中标*的数据为借用口入致癌强度系数计算结果.下同;皮肤致癌强度系数均由口入数据代替,缺乏口入致癌强度系数者未作评价.下同

表 6 职业人群道路降尘非致癌危险度评价结果¹⁾

Table 6 Non-carcinogenic risks of occupational workers				
	污染物	吸入途径	皮肤途径	危险度
消毒副产物	氯仿	2.49E-09*	5.85E-10	3.07E-09
	一溴二氯甲烷	1.27E-10*	2.98E-11	1.57E-10
	二溴一氯甲烷	6.70E-11*	1.58E-11	8.28E-11
	溴仿	3.50E-11*	8.23E-12	4.33E-11
挥发性有机物	四氯化碳	2.96E-11*	6.97E-12	3.66E-11
	二氯甲烷	3.84E-10*	9.03E-11	4.74E-10
	1,2-二氯乙烷	1.96E-09	2.59E-10	2.22E-09
	苯	4.36E-10	4.31E-10	8.68E-10
	甲苯	7.50E-13	1.98E-13	9.48E-13
	乙苯	4.93E-13	6.50E-13	1.14E-12
	二甲苯	1.64E-11	1.08E-12	1.75E-11
农药	DDT	1.47E-11*	3.47E-12	1.82E-11
	六氯苯	3.02E-10*	7.11E-11	3.73E-10
重金属	砷	1.36E-10*	3.19E-10	4.55E-10
	镉	2.35E-10*	5.53E-10	7.88E-10
	铬(VI)	5.14E-08	1.81E-10	5.16E-08
	汞	2.74E-11		2.74E-11
	镍	1.49E-10*	3.49E-10	4.98E-10
	总危险度	5.78E-08	2.90E-09	6.07E-08

1) 吸入非致癌危险度评价中标*数据为借用经口途径 RfD 计算结果.下同;皮肤 RfD 均由经口途径 RfD 代替,缺乏经口途径 RfD 者未作评价.下同

表 7 非职业人群致癌危险度评价结果

Table 7 Health risks of common people caused by carcinogens			
污染物	暴露评价		
	行人	临街工作人员	
消毒副产物	氯仿	1.65E-07	4.99E-07
	一溴二氯甲烷	2.53E-08*	7.68E-08*
	二溴一氯甲烷	1.82E-08*	5.51E-08*
	溴仿	2.22E-10	6.72E-10
挥发性有机物	四氯化碳	8.96E-11	2.71E-10
	二氯甲烷	3.12E-09	9.45E-09
	1,2-二氯乙烷	7.42E-08	2.25E-07
	苯	1.65E-08	4.99E-08
农药	DDT	2.06E-10	6.24E-10
	六六六	4.74E-10	1.44E-09
	六氯苯	3.20E-08	9.71E-08
重金属	砷	5.70E-08	1.73E-07
	镉	6.09E-08	1.85E-07
	铬(VI)	7.96E-07	2.41E-06
	总危险度	1.25E-06	3.78E-06

表 8 非职业人群非致癌危险度评价结果
Table 8 Non-carcinogenic risks of common people

污染物	暴露评价	
	行人	临街工作人员
消毒副产物	氯仿	4.01E-10*
	一溴二氯甲烷	2.04E-11*
	二溴一氯甲烷	1.08E-11*
	溴仿	5.65E-12*
挥发性有机物	四氯化碳	4.78E-12*
	二氯甲烷	6.19E-11*
	1,2-二氯乙烷	3.17E-10
	苯	7.04E-11
	甲苯	1.21E-13
	乙苯	7.96E-14
	二甲苯	2.65E-12
农药	DDT	2.38E-12*
	六氯苯	4.88E-11*
重金属	砷	2.19E-11*
	镉	3.79E-11*
	铬(VI)	8.29E-09
	汞	4.42E-12
	镍	2.40E-11*
总危险度		9.32E-09
		2.82E-08

5 不确定性因素分析

本研究健康风险评价结果存在以下不确定性:

(1)本研究对以城市污水为水源的再生水中 19 种污染物的个体暴露危险度进行评价时,采用的是对现状水质和使用情况监测数据的最高值,结果反映的有可能是暴露人群(职业人群和公众)在现状条件下由于接触再生水而增加的最高危险度.

(2)本研究暴露参数主要是根据道路降尘作业的典型工况和现场实际情况,并考虑一定的修正系数获得的,不包括某些操作不当或其他个别因素引起的风险,如误用、误饮、事故等情况从而增加的风险.

(3)目前国际上有关健康风险评价模型和方法有致癌强度系数法、耐受分布模型、对数模型等.本研究选择了通用的致癌强度系数法,其结果也存在一定的不确定性.

(4)目前国外文献中有关的剂量反应关系大多

是利用饮用水的研究资料,染毒方式多为经口途径,而本研究的实际暴露途径主要是经皮肤接触和吸入暴露,由于因暴露途径不同,对本研究的健康危险度评价结果可能出现一定的不确定性.

6 结论

(1)对再生水用于道路降尘职业人群和非职业人群的健康危险度进行研究结果表明,北京市再生水回用于道路降尘,在目前的应用范围和用量水平下,再生水中 19 种重金属、有机污染物,对职业人群和非职业人群的终生总致癌健康危险度均小于 10^{-5} ,其健康危险度基本在可接受的人群健康风险范围内.

(2)职业人群不同污染物的致癌危险度在 $10^{-10} \sim 10^{-6}$ 之间,总致癌危险度为 8.47×10^{-6} ;非职业人群不同污染物的致癌危险度在 $10^{-11} \sim 10^{-6}$ 之间,总致癌危险度为 3.78×10^{-6} ;职业人群的健康危险度大于非职业人群的健康危险度;非职业人群中临街工作人员危险度大于行人的危险度.

(3)目前北京市再生水道路降尘的应用范围和使用量尚处于较低的水平,今后如果对再生水进行更大规模的开发和利用,则暴露水平和暴露时间都会相应增加,其人群健康危险度也会增加,因此对其安全性应在本研究基础上进一步慎重考虑.

参考文献:

[1] NRC. Science and Judgment in Risk Assessment [M]. National Academy Press, Washington, D.C., 1994.

[2] 王黎华,卢国呈,刘君卓,等编译.健康危险度评价——案例[J].环境与健康杂志,1996,13(增刊):24~26.

[3] US EPA. Exposure Factors Hand Book[R]. Washington, DC. EPA/600/P-95/002Fa. August 1997.

[4] 北京市卫生局《北京市卫生年鉴》编辑委员会编.《2000年北京卫生年鉴》.北京:北京科学技术出版社.2000.

[5] 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.

[6] USEPA. Integrated Risk Information System (Electronic data base). [EB/OL] <http://www.epa.gov/iris>. 2005.