

A Method of Human Health Risk Assessment for Reclaimed Water

Huang Guozhong¹, Chen Ying¹, Chang Jiang², Gan Yiping², You Yang¹

¹Civil & Environment Engineering School, University of Science & Technology Beijing, Beijing, China 100083

²Beijing Drainage Group Research Center, Beijing, China 100022

E-mail: huangguozhonghz_001@sina.com, windycy@126.com

Abstract: According to reclaimed water reuse applications and water quality requirements, analysis and summarization of safety evaluation characteristics in the process of reclaimed water reuse. The event tree analysis (ETA) method was introduced to determine the risk flow route of reclaimed water reuse, and based on this, put forward water safety assessment index system framework. Using the traditional theory of risk assessment initially establish the safety of reclaimed water quality assessment model.

Keywords: reclaimed water; risk assessment; ETA; health

再生水回用对人体健康影响的安全评价方法

黄国忠¹, 陈颖¹, 常江², 甘一萍², 尤杨¹

¹北京科技大学 土木与环境工程学院, 北京, 中国, 100083

²北京城市排水集团 科技研发中心, 北京, 中国, 100022

E-mail: huangguozhonghz_001@sina.com, windycy@126.com

摘要: 根据再生水的回用途和水质要求, 分析并总结了再生水回用过程中的安全评价特征, 采用事件树的方法构建了再生水回用过程的风险传递路径, 并在此基础上提出了相关水质安全评价指标体系的构架, 利用传统风险评价理论初步建立出了再生水水质安全评价模型。

关键词: 再生水; 安全评价; 事件树; 健康

1 引言

再生水是城市污水经过适当再生处理工艺后具有一定使用功能的水, 其中仍可能含有一定的有毒有害物质^[1]。随着再生水处理工艺的日益成熟, 再生水得到了广泛的应用, 已成为水资源的重要补充。再生水回用具有污染物含量低、应用范围广、与人体接触几率大、持续时间长等特点, 其回用方向可以简单的归结为农业灌溉、工业用水、市政杂用、娱乐用水、河湖景观水体维护、地下水回灌、间接作为综合水资源等几方面^[2]。

城市再生水用于冲厕、洗车、生活小区的绿化、灌溉和景观用水等人体暴露量大、接触频繁的场所时, 其中的有毒有害化学物质、细菌、病毒等病原微生物对人体健康会造成危害^[3], 这就迫切需要利用安全评价技术将再生水中有害成份对公众健康可能产生的影响进行风险评价, 保证再生水回用过程中不会对人体

造成健康危害。再生水的水质安全评价不能仅仅停留在污染物造成的危害是否严重的描述上, 而应该将污染物的严重程度量化, 以风险度来直接表达其对人体的危害。评价再生水的风险也可以指导再生水的管理和决策, 保证回用的顺利实施。

2 评价特征分析与总结

各类污水再生回用水质标准是再生水处理工艺选用的基本依据。为控制水污染、确保再生水的安全使用, 当前世界各国和相关世界组织根据再生水的不同回用途, 制定了相应的水质标准, 由于回用对象, 类型、使用场景及最终接纳水体等情况具有复杂性和多变性, 因此各种用途的再生水水质标准也各不相同。目前国内有关部门共颁布了七项城市污水再生回用标准^[4], 见表1。

再生水回用对人体健康影响的安全评价由于其对象的特殊性, 和传统的安全评价有所不同, 再生水中的有毒有害污染物质众多, 对人体健康的危害根据其

资助项目: 国家水专项计划项目 (2008ZX07314-008-05)

使用途径不同而有所差别。再生水可能的回用途径及其对人体健康产生的危害见表 2。

根据再生水自身的特性，结合传统安全评价基本理论和方法，可以得出再生水回用对人体健康影响安全评价主要有以下特点：

- ①回用途径繁多，使用场景复杂；
- ②水质指标不统一，历史数据难于收集；
- ③处理工艺千差万别，程度难于控制；
- ④风险影响因素众多，相互关系难于确定；
- ⑤评价标准难于统一，风险水平界定与描述困难。

Table 1. Domestic reclaimed water quality standards

表 1. 国内城市污水再生回用相关的水质标准

标准编号	标准名称	水质指标数量
GB/T 18919-2002	《城市污水再生利用分类》	污水再生利用分为 5 类用途
GB 50335-2002	《污水再生利用工程设计规范》	
GB/T 18920-2002	《城市污水再生利用城市杂用水水质》	控制指标 13 项
GB/T 18921-2002	《城市污水再生利用景观环境用水水质》	基本控制指标 14 项、选择控制项目 50 项
GB/T 19923-2005	《城市污水再生利用工业用水水质》	基本控制指标 20 项
GB/T 19772-2005	《城市污水再生利用地下水回灌用水水质》	基本控制项目 21 项、选择控制项目 52 项
GB 20922-2007	《城市污水再生利用农田灌溉用水水质》	基本控制项目 19 项、选择控制项目 17 项

Table 2. Reclaimed water reuse applications and the possible hazards to human health

表 2. 再生水回用途径及可能对人体健康产生的危害

再生水回用途径	可能对人体健康产生的危害
农业用水（灌溉食用、非食用作物）	灌溉后土壤板结,污染地下水,农作物中毒素的积累
工业用水（循环水、冷却水、锅炉补给水）	病原微生物通过风吹溅落等途径对人体产生危害,设备及管道的结垢、腐蚀、堵塞和微生物滋生
城市杂用水（绿化、洗车、冲厕）	再生水回用过程中致病菌通过直接接触或气溶胶传播对人体健康产生危害
景观环境用水（公园、湿地、池塘）	细菌、病毒对人体的眼、鼻喉等接触部位产生危害,富营养化及藻类繁殖,对水生生物产生危害

补充水源（地下水回灌、可能污染作为饮用水源的地下含水层，难降饮用和非饮用水源补给）解有机物和重金属对地下水的影响。

3 构建再生水回用风险传递路径及指标体系

3.1 风险传递路径构建

再生水回用产生的人体健康风险具有多样性，表现形式为再生水中存在的有毒有害的物质通过再生水载体回用，导致对影响人体健康各种危害的发生。本文所涉及的再生水人体健康风险评估为预测风险评价，再生水的人体健康风险从最初的再生水中存在的有毒有害的污染物质→再生水的危害→回用再生水→人体接触再生水→人体致癌致病危害，表现形式由确定的再生水危害到人体通过不同的途径接触再生水，最终产生人体健康危害后果，这种从再生水本身的危害到人体危害的风险传递，与传统安全评价中的危险演变过程是一致的。

因此，本文采用传统安全评价中的事件树分析方法(Event Tree Analysis, ETA)进行再生水回用风险传递路径的构建，首先将导致人体健康风险的原因确定为顶上事件，根据风险的传递关系构造事件树，推断模拟风险的场景，分析产生人体健康危害的后果，并对造成危害的可能性和严重性进行量化或半量化分析^[5]。再生水风险传递途径如图 1 所示。

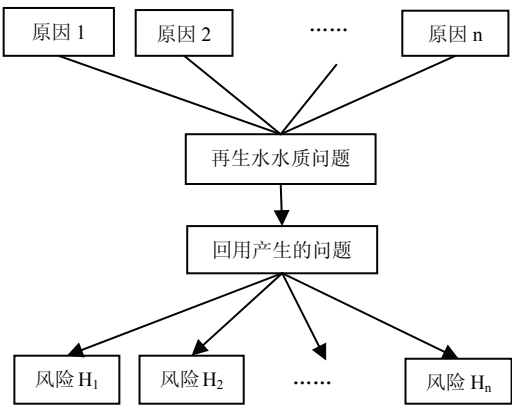


Figure 1. The risk flow route of reclaimed water reuse

图 1. 再生水风险传递路径

3.2 评价指标体系建立

根据再生水的风险传递路径，分析再生水中已经存在的各种污染物以及这些污染物会对人体健康造成的各

种危害,选择污染物中对人体健康危害较大(如病原体、致癌、国际禁用等)的,将可能经过皮肤接触渗入或经过空气吸入危害较大的污染物确定为再生水的主要有害物质,从中提出了一些能全面反映再生水人体健康风险评价的关键性指标。

以指标的独立性、易获性、可比性和针对性等原则为基础,筛选出了一系列指标作为再生水人体健康风险评价的指标集,构建了3层次的再生水人体健康风险评价指标体系:第1层次为目标层,人体健康风险评价为总目标;第2层次为要素层,包括一般指标、致癌化学物质指标、非致癌化学物质指标、病原微生物指标;第3层次为指标层,是最基本的评价指标,详细描述了要素层。再生水人体健康风险评价指标体系如图2。

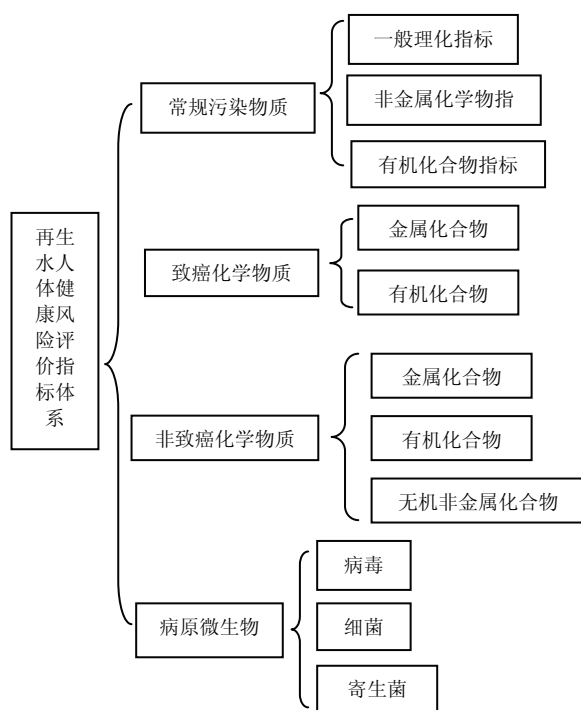


Figure 2. Reclaimed water safety assessment index system in human health risk

图 2. 再生水人体健康风险评价指标体系

4 再生水人体健康风险评价方法

4.1 评价理论方法选择

风险是指“遭受损害、损失的可能性”^[6],目前普遍承认的风险用数学式子可表示为: $R=S \times P$ ^[7], R

表示某种影响或危害的风险, S 表示影响或危害的严重程度, P 为影响或危害发生的机率。

健康风险评价(Health Risk Assessment, HRA)是以风险度作为评价指标,把环境污染与人体健康联系起来,定量描述污染对人体产生健康危害的风险^[8]。目前最常用的是美国国家科学院和国家研究委员会1983年提出的环境健康风险评价的四步模式,即危害鉴别(Hazard Identification),暴露评价(Exposure Assessment),剂量反应分析(Dose-Response Analysis),风险表征(risk Characterization)^[9]。目前这个四步模式已广泛应用于致癌物的健康风险评价,而非致癌物的健康风险评价目前也基本遵循这个评价步骤。

4.2 评价程序

美国环境保护局(Environment Protect Agency, EPA)对化学物质的人体健康风险研究较为充分,建立了综合风险信息数据库。对某一化学物质该系统给出对人体健康影响的定性描述和定量评价。对于非致癌物质,给出口服参考剂量($RfDs$)和吸入参考剂量($RfCs$);对致癌物质,给出致癌强度分类、致癌物致癌强度系数(q)。因此可借鉴 EPA 评价饮用水中化学物质健康风险的方法来评价再生水的人体健康风险。

由指标体系的建立得知再生水人体健康风险主要是来源于其中对人体有毒有害的各种物质,这些物质一般分为两类:化学物质和病原微生物,前者又可分为化学致癌物质和化学非致癌物质。根据再生水风险传递路径中污染物质对人体产生的危害,以及健康风险评价理论方法,可建立不同类型污染物对人体健康影响的风险评价模型。

根据再生水风险传递路径、指标体系的构建及人体健康风险评价的相关理论拟定再生水人体健康风险评价程序如图3。

4.3 风险评价模型

再生水人体健康风险评价需要使用大量的数据资料、计算公式、数学模型,主要包括两类:一类是暴露评价常用的模式,主要是用于计算人体对化学物质吸收、摄取、吸入剂量,据以分析人体的暴露水平;一类是风险表征计算模式,用于表征再生水的人体健康风险。

4.3.1 暴露评价模型

人体使用再生水过程中的暴露途径主要有食物、饮水、呼吸及皮肤吸收等^[10]，暴露量与回用途径及回用方式密切相关。计算年风险时，还要考虑不同情况下的年暴露次数。表 3 为再生水回用暴露途径和暴露量的计算。

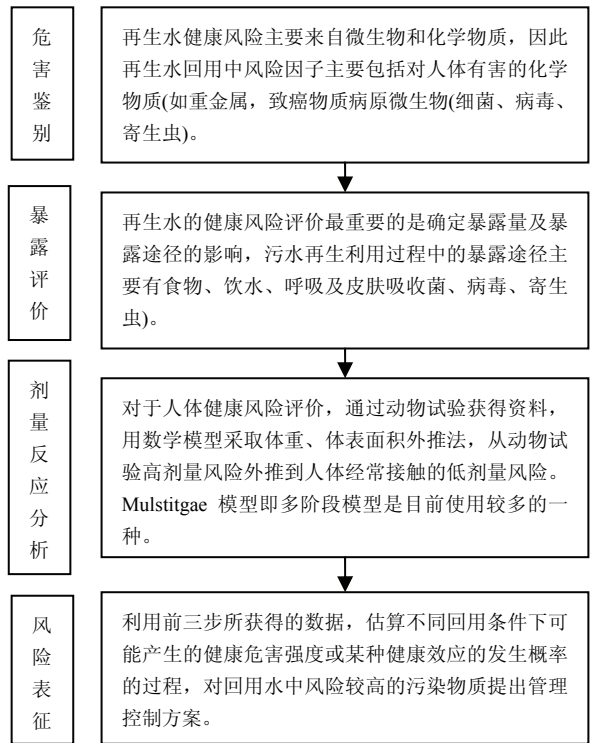


Figure 3. The reclaimed water health assessment procedures

图 3. 再生水人体健康评价程序

Table 3. Reclaimed water exposure pathways and exposure

表 3. 再生水回用暴露途径和暴露量

暴露途径	暴露量计算公式
饮食摄入	$CDI_{oral}=(CW\times IR\times EF\times ED)/(BW\times AT)$
皮肤吸收	$AD=(CW\times SA\times PC\times ET\times EF\times ED)/(BW\times AT)$
呼吸吸入	$CDI_{inhalation}=(CA\times IR\times ET\times EF\times ED)/(BW\times AT)$

式中 CDI_{oral} 为饮食摄入途径的慢性日吸收量, AD 为皮肤吸收的慢性日吸收量, $CDI_{inhalation}$ 为皮肤吸收的慢性日吸收量, $mg/(kg\cdot d)$; CW 为水中化学物质的浓度, mg/L ; IR 为摄入速率, L/day ; EF 为暴露频率, $days/year$ 或 $event/year$; ED 为暴露时段, $year$; BW 为

身体重量, kg ; AT 为平均时间, $days$; SA 为可接触的皮肤表面积, cm^2 ; PC 为皮肤表面特定化学污染物的渗透常数, cm/h ; ET 为暴露时间, h/day 或 $h/event$; CA 为空气中污染物浓度, mg/m^3 ;

在对致癌风险作以上评估时, 平均身体重量, 空气呼入量、饮水摄入速率等都作了一定的假设。USEAP 规定了一系列标准数值, 例如平均体重男性为 $70kg$, 女性为 $60kg$, 居民的耗水量成人 $2L/day$ 。由于地域和生活习惯的差异, 可考虑调查中国的实际情况来确定这些标准数值。

4.3.2 风险表征计算模型

(1) 致癌风险评价模型

致癌污染物健康风险模型^[11]可表示为:

$$P=1-\exp(-qD) \tag{1}$$

式中 P 为患癌终生风险; D 为化学致癌物的单位体重日均暴露剂量, $mg/(kg\cdot d)$; q 为致癌强度系数 (carcinogenic potency factor), $[mg/(kg\cdot d)]^{-1}$ 。

若考虑多种化学致癌物的多种暴露途径时, 则有:

$$p_{ij}=1-\exp(-q_{ij}D_{ij}) \tag{2}$$

式中 P_{ij} 为化学致癌物 i 经暴露途径 j 所致的患癌风险, 无量纲; D_{ij} 为化学致癌物 i 经暴露途径 j 的单位体重日均暴露剂量, $mg/(kg\cdot d)$; q_{ij} 为化学致癌物 i 经暴露途径的致癌强度系数, $[mg/(kg\cdot d)]^{-1}$ 。

当环境有多种有毒物质共同作用于人体时, 假定这时人体健康危害的总风险等于各单个污染物所诱发风险的总和, 即各有毒物质的风险是等权的且可以算术相加的, 而不考虑其毒性终点和不同有毒物质的协同和拮抗作用。总风险 P 可表示为:

$$p=\sum_i\sum_jp_{ij} \tag{3}$$

(2) 非致癌风险评价模型

非致癌污染物健康风险模型^[12]可表示为:

$$p=\frac{d}{RfD}\times 10^{-6} \tag{4}$$

式中 P 为发生健康危害的终生风险, 无量纲; d 为非致癌污染物的单位体重日均暴露剂量, $mg/(kg\cdot d)$; RfD (Reference Dose) 为该种化学物质的参考剂量, $mg/(kg\cdot d)$ 。

考虑多种非致癌化学污染物的多种暴露途径:

$$p_{ij}=\frac{d_{ij}}{RfD_{ij}}\times 10^{-6} \tag{5}$$

其中 P_{ij} 为污染物 i 经暴露途径 j 引起健康危害的终生风险, 无量纲; d_{ij} 为污染物 i 经暴露途径 j 的单位体重日均暴露剂量, $\text{mg}/(\text{kg}\cdot\text{d})$; RfD_{ij} 为污染物 i 经暴露途径 j 的参考剂量, $\text{mg}/(\text{kg}\cdot\text{d})$ 。

总风险 P :

$$P = \sum_i \sum_j p_{ij} \quad (6)$$

(3) 病原微生物评价模型

常用的数学模型有两种, 一种是指数模型, 一种是 Beta-Poisson 模型^[13,14]。指数模型为:

$$P_i = 1 - e^{-rd} \quad (7)$$

式中 r 为假设随机的单个病原体的感染概率为常数; d 为摄入人体的剂量; P_i 为感染概率

对许多病原体来说, 其一定剂量下的感染发病率要小于上式计算得到的概率, 反映了不同病原体和寄主之间的相互作用存在差异性, 假设单个病原体的感染概率服从 Beta 分布, 则可由上式导出 Beta-Poisson 模型:

$$p_i = 1 - \left[1 + \frac{d}{N_{50}} (2^{\frac{1}{\alpha}} - 1) \right]^{-\alpha} \quad (8)$$

式中 P_i 为接触感染概率; d 为摄入人体内病毒的个数; N_{50} 为感染 50% 暴露人群的病毒个数; α 为斜率参数, N_{50} 与 P_i 的比值。

4.4 综合风险评价

采用风险矩阵对再生水人体健康的综合风险评价进行评价, 将再生水中各种有害物质对人体健康的危害的严重度 S 和可能性 P 通过计算模型得出, 再根据 $R=f(S, P)$, 建立风险矩阵, 得出再生水对人体健康的综合风险水平。

对于严重度 S , 在再生水中表示有毒有害的物质对人体健康危害的严重度, 可利用统计数据来划分各有害物质对人体健康危害的严重程度。借鉴 USEPA 的致癌性风险计算中的分类方法, 将化学物质对人体致癌证据的强弱进行分类 (Weight of Evidence), 共分成六类 (A、B1、B2、C、D、E), 表 4 为化学物质致癌严重程度等级表。

可能性 P , 在再生水表示再生水人体健康风险发生的概率。用层次分析法来确定各指标的权重, 暴露评价模型和风险表征计算模型来计算风险概率并借助计算机程序和概率论来处理数据。如采取蒙特卡罗 (Monte-Carlo) 水晶球 (Crystal ball) 计算软件对各种致

Table 4. The severity scale of Carcinogenic chemicals

表 4. 化学物质致癌严重程度等级表

类别	描 述
A	确定为致癌物质
B	B1 很可能 有少量的人体患癌的证据
	B2 致癌 动物致癌证据充分人体致癌证据不足
C	可能为致癌物质
D	没有被列为人体致癌物质
E	有证据表明为躯体毒害化学污染物

癌物的终生致癌风险和年致癌风险进行计算, 对所有风险值的概率分布进行分析, 得到致癌风险的概率分布及其风险值的范围等统计信息。

在确定出 S 、 P 之后, 通过风险矩阵确定再生水对应的总的风险水平。再确定总的风险是否可被接受。

5 结论

(1) 根据目前国内已有的再生水回用水质标准和回用途径, 总结出了再生水回用过程中对人体健康影响的安全评价特征。

(2) 采用事件树的方法构建了再生水回用过程的风险传递路径; 通过风险传递路径分析影响人体健康的指标, 构建出 3 层次的再生水人体健康风险评价指标体系。

(3) 将传统的安全评价理论与再生水回用的人体健康风险特性相结合, 初步建立出了再生水人体健康风险评价程序和模型。

References (参考文献)

- [1] Qiu Fuguo, Wang Xiaochang. Risk Assessment on Health Effects of Viruses in Reused Wastewater in City[J]. *J Environ Health*, 2003, 20(4), P197-199.
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), P197-199.
- [2] Chen Xiurong, Zhang Jie, Chen Xu. Discussion on the Directions of Wastewater Reclamation and Reuse and the Water Quality Standards[J]. *China Water & Wastewater*, 2003, 19(1), P92-94.
陈秀荣, 张杰, 陈旭. 污水再生回用方向及其水质标准的探讨[J]. 中国给水排水, 2003, 19(1), P92-94.
- [3] Yin Qianqian, Wang Long, Jiao Yingying, et al. The Concept and Method of Health Risk Assessment for Urban Wastewater Reuse[J]. *Journal of Shandong Jianzhu University*, 2008, 23(2), P141-144.
尹倩倩, 王龙, 焦盈盈, 等. 城市污水回用健康风险评价的内涵与方法[J]. 山东建筑大学学报, 2008, 23(2), P141-144.
- [4] Writing by 'Guidelines for urban reclaimed water series standard' Writing Group. Guidelines for urban reclaimed water series standard [M]. Standards Press of China, 2008.

- 《城市污水再生利用系列标准实施指南》编写组编. 城市污水再生利用系列标准实施指南[M]. 中国标准出版社, 2008.
- [5] Luo Yun, Fan Yunxiao, Ma Xiaochun. Risk Analysis and safety Assessment. Beijing: Chemical Industry Press, 2005
罗云, 樊运晓, 马晓春. 风险分析与安全评价[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
- [6] Aaron A, Jennings, P Suresh. Risk Penalty function hazardous waste management[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 1986, 112(1), P105-122.
- [7] Bai Zhipeng, Wang Jun, You Yan. Environmental Risk Assessment[M]. Beijing: Higher Education Press, 2009.
白志鹏, 王珺, 游燕. 环境风险评价[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009.
- [8] Han Bing, He Jiangtao, Chen Honghan, et al. Primary Study of Health-based Risk Assessment of Organic Pollution in Groundwater[J]. *Earth Science Frontiers*, 2006, 13(1), P224-229.
韩冰, 何江涛, 陈鸿汉, 等. 地下水有机污染人体健康风险评价初探[J]. 地质前缘, 2006, 13(1), P224-229.
- [9] National Academy of Sciences (NAS). Risk Assessment in Federal Government: Managing the Process[M]. Washington DC: National Academy Press, 1983.
- [10] He Xinghai, Ma Shihao, Li Anding, et al. Exposure Assessment of Various Reclaimed Water Uses[J]. *Environmental Science*, 2006, 27(9), P1912-1915.
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), P1912-1915.
- [11] Wan Yiwen, Kang Tianfang, Zhou zhongliang, et al. Health Risk Assessment of Volatile Organic Compounds in Water of Beijing Guanting Reservoir[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2009, 22(2), P150-154.
万译文, 康天放, 周忠亮, 等. 北京官厅水库水体中挥发性有机物健康风险评价[J]. 环境科学研究, 2009, 22(2), P150-154.
- [12] Wang Qiulian, Zhang Zhen, Liu Wei. Environmental Health Risk Assessment of Drinking Water Source in Tianjin[J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, 32(5), P187-190.
王秋莲, 张震, 刘伟. 天津市饮用水源地水环境健康风险评估[J]. 环境科学研究, 2009, 32(5), P187-190.
- [13] Haas C. N. . How to Average Microbial Densities to Characterize Risk[J]. *Water Reserach*. 1996, 30, P1036-1038.
- [14] Andrew J. Hamilton, Frank Stagnitti, Sarath C. Kumarage, et al. RIRA: A Tool for Conducting Health Risk Assessments for Irrigation of Edible Crops with Recycled Water[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2007, 57, P80-87