

污水再生利用的健康效益评价

曹 冰, 陈 荣, 王晓昌

(西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710055)

摘 要: 本文通过水体中病原菌与疾病的剂量-健康反应关系、疾病与经济损失的健康反应-经济价值关系的建立, 明确了疾病经济损失与水体污染之间的模型关系, 并利用统计分析和人力资本法对疾病引起的直接和间接经济损失进行了量化分析, 建立了健康效益的评价方法与模型, 将其应用于西安市污水再生利用的健康效益评价, 结果表明: 全面的污水再生利用将给西安市带来 1 089 051.70 元/a 的健康效益。

关键词: 污水再生利用; 健康效益评价; 人力资本法; 西安市

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 1671-1556(2010)06-0009-04

Health Benefit Evaluation of Wastewater Reuse

CAO Bing, CHEN Rong, WANG Xiao-chang

(Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: This paper proposes a health benefit value model concerning the relationship between the disease economic loss and water pollution, in terms of the establishment of water pathogens dose-health response and health response-economic value model. Furthermore, the paper involves a particular health benefit evaluation method by statistical analysis of both direct and indirect economic losses through the combination of statistical analysis and human capital approach. The application of health benefit evaluation of wastewater reuse to Xi'an City leads to the result that the fundamental wastewater reuse can bring about health benefit worth 1089051.70 yuan (RMB) per year for Xi'an City.

Key words: wastewater reuse; health benefit evaluation; human capital approach; Xi'an City

0 引 言

水体是疾病传播的主要途径, 水污染将直接导致周围区域内人的疾病增加, 即使是经过二级处理之后的排放水仍然携带有影响人体健康的多种肠道病原菌, 如沙门氏菌、志贺氏菌、溶血性链球菌等, 它们可以造成人体肠胃炎、腹泻、泌尿系感染、胆囊炎、伤寒、副伤寒细菌性痢疾、溶血性黄疸病等多项消化道疾病。污水的再生利用处理是减少水体中病原菌的有效方法, 根据健康风险评价的结果, 经过回用处理之后的再生水年风险概率可以小于 10^{-4} 。疾病的减少意味着个人和社会财产损失的减少, 因此如何准确地评估污水再生利用产生的健康效益成为目前国际环境、卫生领域关注的热点。

对于健康效益的评估计算, 刘光栋等^[1]通过人力资本法(Human Capital Approach, HCA)评估了农业污染地下水的环境价值损失; 靳乐山^[2]也使用类似方法对 2000 年北京大气中 SO_2 浓度削减 50% 的健康效益进行了分析计算; 国际上也常通过支付意愿法(Willingness to Pay, WTP)来进行健康效益分析^[3]。目前, 国内有关健康效益分析工作多限于单种化学物质对人体的生理特性影响, 而对于病原体引发的健康效益分析研究碍于剂量-健康反应关系确立的准确性和数据的有限性未形成系统的分析体系, 故难以得到广泛的研究和应用。笔者从分析常见的水域疾病所造成的经济损失出发, 通过研究水体中引发人体消化道疾病的病原体与潜在患病率之间的关系, 计算该种疾病造成的社会经济损失, 建立污染剂量-健康反应-经济损失模型, 并结合

收稿日期: 2010-04-04 修回日期: 2010-06-04

作者简介: 曹冰(1986—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境健康。E-mail: acaobing@vip.sina.com

西安市的实际情况,全面研究污水再生利用为该城市带来的健康效益,建立城市污水再生利用的健康效益评价方法与模型,以为城市水资源管理和污水治理提供依据。

1 研究思路和方法

1.1 基本思路

污水再生利用的健康效益来源于水体所在区域人群疾病减少所带来的各项损失与费用的减少,与此同时疾病的减少又与排入水体中病原菌数量的减少具有密切的关系,各种因素之间的关系见图 1。笔者以水体污染与病原菌因素作为污染剂量,以疾病的发生作为健康反应,以经济损失和健康效益作为经济价值,通过研究污染剂量与健康反应的关系、健康反应与经济价值的关系,建立污染剂量与经济价值之间的关系,并最终获得污水再生利用的健康效益。

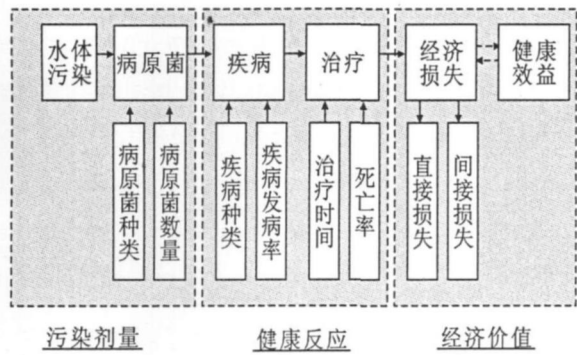


图 1 污染剂量-健康反应-经济价值模型
Fig.1 Relationship among PD, HR and EV

1.2 污染剂量-健康反应关系的确立

污染剂量-健康反应关系是指水体中病原菌与疾病的发病率、死亡率、治愈率、住院率、平均治疗时间等因素之间的函数关系。未经过消毒的水体中广泛存在不同病原体 and 致病菌,其浓度大小与潜在的人体受到该病菌感染发病率存在一定的关系,不同种致病微生物所服从的剂量-反应模型是不同的(见表 1)。

笔者采用指数模型和 Hass 等的 Betα Poission 模型来反映水中肠道病原菌的浓度与可能由此引发的消化道疾病发病概率之间的关系^[4]。

Betα Poission 模型为

$$R_i = 1 - (1 + N/\beta)^{-\alpha}$$
 (1)

指数模型为

$$R_i = 1 - e^{-\alpha N}$$
 (2)

式中: R_i 为传染概率(%); α 、 β 、 γ 为界定剂量-反应曲

线的参数; N 为暴露量(CFU/mL 或 PFU/mL) (病毒斑形成的单位 PFU 或者微生物菌落形成的单位 CFU)。

表 1 不同微生物的最佳拟合剂量-反应模型及参数
Table 1 Best fitting dose-response models and parameters for different microbes

微生物	最佳模型	模型参数
沙门氏杆菌	指数式	$\gamma = 0.00752$
隐孢子虫	指数式	$\gamma = 0.00467$
贾第鞭毛虫	指数式	$\gamma = 0.0198$
霍乱弧菌	Betα Poission	$\alpha = 0.49 \quad \beta = 1073.2$
轮状病毒	Betα Poission	$\alpha = 0.24 \quad \beta = 0.42$
艾柯病毒	Betα Poission	$\alpha = 0.374 \quad \beta = 186.7$

由以上模型可以看出,疾病的发病率与排入水体中的病原菌的浓度具有密切关系。实验证明,水体中的肠道病原菌通过再生利用深度处理之后能有效去除,从而降低因某种病原菌引发疾病的发病率。

通过西安市二级出水中致病菌的检测情况可以得出,西安市二级出水中易引发消化道疾病的肠道致病菌以轮状病毒为主,故采用 Betα Poission 模型,估算出其暴露量 N 为 0.17×10^{-5} CFU/mL^[5],根据表 1 取 $\alpha = 0.24$, $\beta = 0.42$ 。

1.3 健康反应-经济价值关系的确立

水体中病原菌产生疾病对人体健康造成的损失可以分为直接经济损失和间接经济损失。直接经济损失主要表现为医疗花费;间接经济损失是指由于疾病导致的劳动时间的减少和工作能力的减低所造成的经济损失,包括急性病因病缺勤造成的社会损失、慢性病造成的社会损失、因寿命缩短造成的社会损失和急性病患者因需医疗陪护造成的社会损失。

1.3.1 直接经济损失

直接经济损失的计算模型为

$$C_1 = P \sum_{i=1}^n R_i Y_i$$
 (3)

式中: C_1 为直接经济损失(元); P 为受影响的人口数(人); R_i 为第 i 种疾病的传染概率(%); Y_i 为用于治疗该种病原引发的消化道疾病的人均医疗费用(元)。

1.3.2 间接经济损失

与直接经济损失相比,疾病还将造成劳动者工作时间的减少(包括死亡)和工作能力的降低,由此导致的损失即为间接经济损失。笔者将人力资本法的理念融入间接经济损失的计算。

(1) 因病工作时间减少的损失按下式计算:

$$C_{21} = PB \sum_{i=1}^n R_i T_i$$
 (4)

式中: C_{21} 为因病工作时间减少的经济损失(元); B 为人力资本(以人均净产值计算)(元); T_i 为 i 疾病的误工时间(h); 其他同上。

(2) 疾病除了会导致工作时间的减少, 同时也将降低劳动者在初生病和初康复的工作时间内的工作效率, 一般认为这部分的损失可以由因病缺勤的损失乘以一定的系数获得, 因病工作效率减低的损失按下式计算, 即

$$C_{22} = \varepsilon C_{21}$$

(5)

(3) 因死亡或寿命缩短导致的损失按下式计算:

$$C_{23} = YPLL \cdot PB \sum_{i=1}^n R_i$$

(6)

式中: $YPLL$ (Yeas of Potential Life Lost) 为潜在寿命损失年, 即为死亡时实际年龄与期望寿命之差(岁)。 $YPLL$ 是流行病学中用以衡量疾病负担的一个指标, 1982 年美国疾病控制中心首次用它来衡量人群疾病负担和分病因疾病负担, 该值与区域的经济水平、医疗水平等综合指标有关。

(4) 因病需要陪护和护理的经济损失。患者在住院期间, 除了需要治疗以外, 还需要医院的医疗护理和陪护。根据住院患者的病情和严重程度, 护理费用分为五个等级, 即重症监护费用、特级护理费用、一级护理费用、二级护理费用和三级护理费用^[6]。一般情况下, 由于水体污染引起的消化道疾病(如肠胃炎、腹泻、泌尿系感染、胆囊炎、伤寒、副伤寒细菌性痢疾、溶血性黄疸病等)属于二级护理范畴, 护理和陪护费用按下式计算:

$$C_{24} = P \sum_{i=1}^n T_i R_i \omega_i h_i$$

(7)

式中: T_i 为 i 种疾病的住院治疗天数(d); h_i 为 i 种疾病每天的陪护和护理时间(h); ω_i 为 i 种疾病的小时护理费用(元)。

根据以上各式可以得出间接经济损失的计算模型为

$$C_2 = (1 + \varepsilon)PB \sum_{i=1}^n R_i T_i + YPLL \cdot PB \sum_{i=1}^n R_i + P \sum_{i=1}^n t_i R_i \omega_i h_i$$

(8)

2 实例研究

2.1 概况

西安市位于我国中西部地区, 存在水资源短缺、分布不均以及水源污染严重等一系列问题, 污水的资源化回用是一个缓解该问题的必要措施, 然而回

用水的直接使用仍存在较大的健康风险, 可引发多种消化道疾病, 并带来相应的经济价值损失。在经过二级处理之后, 经过检测发现可以有效地减少水中的致病肠道病原菌, 并挽回可能引发的经济价值损失。

2.2 健康反应-经济价值关系的确定

由于肠道病毒检测十分困难, 根据国外已有资料确定以下评价条件: 回用水中病毒与粪大肠杆菌的浓度比值为 $1: 10^5$, 为了安全起见, 可将水中所有病毒近似看作感染性最强的轮状病毒进行计算。通过相关部门检测得出, 北石桥污水处理厂未经消毒的二级出水通过 PCR 方法测出水中的粪大肠杆菌的个数和浓度分别为 2.0×10^4 个和 0.17 CFU/mL , 则估算出水中病毒的浓度为 $0.17 \times 10^{-5} \text{ CFU/mL}$, 通过 Beta-Poisson 计算模型可得 $R_i = 0.96 \times 10^{-6}$ 。

而在经过回用水处理之后, 通过病原微生物风险评价^[7], 可以认为其年风险概率大大降低; 另外, 经过消毒处理之后的回用水用于绿化、灌溉和景观娱乐时可以基本保证其用水的卫生安全。

2.3 水体病原菌人体健康损失计算

2.3.1 直接经济损失

根据西安市人口普查公布的数据, 西安市居民人口数 P 为 806.81 万人, 通过西安市卫生部门统计数据查得 $Y = 2\,046.12$ 元, R_i 为 $0.97 \times 10^{-6/[8]}$, 代入公式(3)计算得 $C_i = 15\,847.96$ 元, 即西安市通过污水资源化回用之后所减少的肠道致病菌量可以挽回直接健康效益货币价值约 1.58 万元。

2.3.2 间接经济损失

(1) 因病工作时间减少的损失计算。由公式(4)(式中 P 、 B 、 R 同上, T 为疾病平均治疗天数, 见表 2), 得 C_{21} 为 123 614.15 元。

表 2 消化道疾病对人体健康损失量情况^[8]

Table 2 Calculation of intestinal disease health losses	
对健康的影响	人体健康损失量
消化道疾病发病率/(%)	11.43
消化道疾病住院率/(%)	11.9
疾病平均治疗天数/(d)	7.8
消化道疾病就诊率/(%)	21.66
治愈率/(%)	64.65
死亡率/(%)	2.83
好转率/(%)	32.30
西安消化道疾病 YPLL/(岁)	2.13

(2) 因病工作效率减低的损失计算。根据文献

[9], 因疾病造成受限活动天数相当于 1/4 个缺勤天。根据公式(5), 因劳动受限造成的社会损失应为 $1/4C_{21}$, 即 $C_{22} = 30\,903.53$ 元

(3) 因死亡或寿命缩短导致的损失计算。根据 1995 年西安市卫生统计数据, 得出消化道疾病的早亡造成的工作年损失为 2.13 a, (取值为 2 a), 即 C_{23}

$$= YPLL \cdot PB \sum_{i=1}^n R_i = 31\,695.94 \text{ 元}$$

(4) 因病需要陪护和护理的经济损失计算。国家护理费用的平均值是: 特级护理费 = 17.25 元/h; 重症监护费 = 11.50 元/h, 一级护理费 = 11.11 元/h, 二级护理费 = 6.97 元/h, 三级护理费 = 1.91 元/h。西安市的不同级别医疗护理费用与全国平均水平近似, 设消化道疾病住院期间医疗护理陪护为二级护理费用, 住院天数 T_i 可近似看作治疗天数, 即

$$C_{24} = P \sum_{i=1}^n T_i R_i \omega_i h_i = 10\,106.04 \text{ 元}$$

则间接经济损失为

$$C_2 = (1 + \epsilon) PB \sum_{i=1}^n R_i T_i + YPLL \cdot PB \sum_{i=1}^n R_i + P \sum_{i=1}^n T_i R_i \omega_i h_i = 1\,073\,203.74 \text{ 元}$$

水体病原菌人体健康损失为

$$C = C_1 + C_2 = 1\,089\,051.70 \text{ 元}$$

3 结 论

(1) 通过计算可知, 西安市二级出水资源化回用处理之后可以为西安市带来健康经济效益

1 089 051.70 元, 可见二级出水的资源化回用不仅可以减少由于治疗水体病原菌引发肠道疾病的相关医疗费用和间接费用, 对于改善西安市的水体环境、缓解水资源不足等问题也具有重要意义。

(2) 从健康风险评价出发, 利用统计学和人力资本法对经济损失进行系统分析和计算, 其方法可靠, 具有广泛的适用性。

参考文献:

[1] 刘光栋, 吴文良, 靳乐山, 等. 人力资本法评估农业污染地下水环境价值损失[J]. 中国环境科学, 2004, 20(2): 372– 375.

[2] 靳乐山. 2000 年北京大气中 SO₂ 浓度削减 50% 的健康效益——人力资本法实例研究[J]. 中国环境科学, 1998, 18(3): 280– 283.

[3] 王蕾, 刘连友, 王志, 等. 北京市园林植物吸附 PM₁₀ 与 SO₂ 总量及其健康效益[J]. 环境科学与技术, 2006, 29(9): 29– 31.

[4] 仇富国, 王晓昌. 水环境中病毒的分布存活及其健康风险评价[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2007, 39(1): 115– 117.

[5] 刘永军, 张崇森, 王晓昌. 通用引物 PCR 方法在地表水病原菌检测中的应用[J]. 环境科学研究, 2007, 20(2): 81– 93.

[6] 李志浩, 吴焱, 李国辉, 等. 浅谈医疗护理费核算方法[J]. 卫生经济研究, 2007, (5): 42– 44.

[7] 石炼, 陈永. 住区污水再生利用健康风险评价初探[J]. 给水排水动态, 2007, (3): 8– 11.

[8] 中华人民共和国卫生部. 2008 中国卫生统计年鉴[M]. 北京: 中国协和医科大学出版社, 2009.

[9] 蔡宏道. 现代环境卫生学[M]. 北京: 人民卫生出版社, 1995: 261.

通讯作者: 王晓昌(1953—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事给水排水、环境工程和市政工程的教学与研究工作。E-mail: xw ang@xauat.edu.cn