

水源河流水质管理中的环境风险评价^{*}

李适宇

盛冈通

(中山大学环境科学研究所, 广州 510275) (日本大阪大学环境工程系)

摘要 以日本的淀川河为对象, 围绕 3个以改善水源水质为目标的方案, 以 THMP为水质指标, 用累积流量模型计算了各方案下两个主要取水口的水质浓度. 以此为基础, 用两种 THM致癌率内插方法估算了饮用水中的 THM引发的致癌风险, 并据此对各方案进行了评价.

关键词 河流水质管理, THM, 风险评价

分类号 X 828

自从 70年代初荷兰的研究者发现鹿特丹市的自来水中含有致癌性物质 THM(tri-halomethane), 并证实这是由于水源莱茵河中存在的腐植质等在净水处理时与氯气反应而生成的副产品之后^[1], 世界各国尤其是发达国家出于对饮用水安全性的考虑, 对 THM生成的机理及抑制方法进行了大量研究^[2]. 为了评价水体所含有有机物在加氯消毒时产生 THM的潜能, 研究者们制定了统一标准, 分析测试在与净水处理相似加氯条件下的 THM产生量, 称之为 THMP(trihalomethane potential), 以此作为评价指标. 调查结果^[3]表明, 河水中的 THMP来源很广, 一般的生活污水和工业有机废水以及自然界中未受人为污染的河水中, 都不同程度地含有 THMP.

本文以日本关西地区最重要的水源河流淀川为对象, 运用环境风险评价的方法, 对几种水源水质管理方案下的取水口 THMP浓度进行计算, 并以 THM引发致癌风险的角度进行评价.

1 对象河流及管理对策方案

淀川由木津川、宇治川及桂川 3条河流在京都市南面汇合而成(图 1). 这 3条河流的平均流量分别为 $48 \text{ m}^3/\text{s}$, $178 \text{ m}^3/\text{s}$, $37 \text{ m}^3/\text{s}$. 木津川和宇治川目前的水质较好, 但桂川因受京都市的污水处理厂排放水的影响, 水质较差. 大阪的两个最大的自来水管厂的取水口都设在淀川, 其中村野水厂的取水口位于合流点下游约 6.4 km 处的左岸, 取水量为 $200 \text{ 万 m}^3/\text{d}$, 供水人口约 400 万人; 柴岛水厂的取水口位于合流点下游约 23.8 km 处的右岸, 取水量为 $150 \text{ 万 m}^3/\text{d}$, 供水人口约为 300 万人. 由于桂川污染物浓度较高, 3条河流汇合后沿淀川右岸形成一条污染带, 在横向扩散作用下向左岸扩展. 在村野取水口附近, 断面方

* 国家教育委员会留学回国人员科研基金资助项目

收稿日期: 1995-09-20 李适宇, 男, 39岁, 副教授

向的浓度尚存在明显的差别,右岸浓度高于左岸浓度,而在下游的柴岛取水口附近,全断面的水质已接近完全混合.在村野取水口下游不远处,有 3 条小河从左岸汇入,这些小河流量很小,但污染较严重.

图 1 淀川示意图

Fig. 1 Map of the Yodo River

图 2 水质管理对策方案

Fig. 2 Alternatives for river quality management

目前村野取水口附近的 BOD 平均浓度约为 2 mg/L,柴岛取水口附近则约为 3 mg/L.从饮用水的安全性来说,原水的污染越严重,净水处理时需注入的氯气就越多,生成的 THM 也就越多.考虑到这一点,有关部门提出 3 个旨在改善取水口水质的方案,如图 2 所示.方案 1 是将目前排入宇治川的洛南污水处理厂的排放水引到桂川去排放,利用淀川的横向扩散特性改善村野的水质,但对柴岛的水质改善起不到作用.方案 2 是将 3 条小河的污水截流后排往柴岛的下游,此举可改善柴岛的水质,但对上游的村野并无作用.方案 3 是将柴岛取水口转移到流量大、水质较好的宇治川,一举改变其目前的困境.

2 负荷量及取水口水质计算

2.1 负荷量

根据大阪市水道局连续两年对水源中的 THMP 进行每月 1 次的调查结果^[4],发现汇流了河流的 THMP 负荷量 L 与流量 Q 之间的关系可以用以下的幂函数来表示:

$$L = a \cdot Q^b \quad (1)$$

利用 L 和 Q 的实测数据进回归分析,求得各河流的回归系数 a, b 值及相关系数 r ,结果如表 1 所示.各河流的 V 值均在 0.9 以上,说明相关程度是相当高的.

从回归分析结果可知,3 条河流的 THMP 负荷量都是随流量增大而

表 1 回归系数与相关系数

Tab. 1 Regression and correlation coefficients

河流	a	b	r
木津川	1.944	1.249	0.979
宇治川	0.701	1.340	0.942
桂川	16.315	0.823	0.901

增加. 这个结果印证了一个事实, 即 THMP 不仅存在于生活污水和工业废水那样的人为污染排放水中, 而且也存在于天然水体中, 可以看成是背景浓度. 河流流量增大时, 虽然人为污染负荷量不变, 但源自背景浓度的负荷量却增加了, 而且降雨冲刷引起地表的有机质流出亦会导致负荷量增加. 在 3 条河流中, 木津川和宇治川受人为污染影响较小, 其 THMP 负荷量中天然背景成分所占比例较多, 因此负荷量随流量增加的倾向较明显, 回归分析的结果是 b 值较大. 相比之下, 受人为污染影响较大的桂川的 b 值就较小.

小河流的 THMP 实测数据较少, 难以求出负荷量与流量之间的关系, 故以平均负荷量作代表, 为 71.11 kg/d. 另外, 洛南污水处理厂的排出负荷量为 38.40 kg/d.

2.2 水质模型

由于村野取水口附近的水质受到横向扩散的影响, 所以淀川的浓度用描述二维移流扩散的累积流量模型^[5]来计算:

$$\frac{\partial c}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial z} (m_x h^2 u \quad Ez \frac{\partial c}{\partial z}) \quad (2)$$

$$q_c = \int_0^z m_z h u dz \quad (3)$$

式中, x 与 z 分别为河流纵向与横向坐标; c 为浓度; h 为水深; u 为垂向平均流速; Ez 为横向扩散系数; m_x 与 m_z 分别为曲线坐标在 x 与 z 方向的度量系数.

2.3 取水口处的 THMP 浓度

利用上述水质模型进行计算机模拟计算, 分别求出村野和柴岛两个取水口处在现状及 3 个水质管理方案的情况下的 THMP 浓度, 其累积频率如图 3 所示. 计算时的流量是根据过去 5 a 每日实测的汇流 3 河流的流量数据进行聚点分析, 用非阶层方法求出有代表性的 50 个流量组合, 然后就每种组合分别进行水质浓度计算并求出相应的频率^[6].

图 3 取水口 THMP 浓度的累积频率

Fig. 3 Cumulative frequency of THMP concentration at water intakes

3 饮用水中 THM 的环境风险评价

3.1 THM 致癌率

由于无法从事人体试验, THM 对人体的致癌率只能通过对动物试验的结果进行内插来推算. 住友^[7]根据美国国立癌症研究所 (NCI) 对老鼠投喂三氯甲烷 (THM 的一种) 引发癌症的试验结果, 用最小二乘法求出 THM 致癌率公式:

$$P_c = \left[\frac{1}{1 + \exp(2.967 - 3.415 \times 10^{-7} C)} \right] - \left[\frac{1}{1 + \exp(2.967)} \right] \quad (4)$$

式中, P_c 为致癌率(人/a); C 为饮用水中 THM 浓度($\mu\text{g/L}$). 在推求上式时, 假定人体重 60 kg, 每天饮用自来水 2 L. 此外, 美国 EPA^[8] 提出的指南认为, 对应于三氯甲烷浓度为 $0.19\mu\text{g/L}$ 的饮用水, 其致癌率为 $P_c = 10^{-6}$ 人/70a, 即每 100 万人中, 一生(70 岁)有 1 人得癌症.

3.2 致癌风险的估算

环境风险的定义是有害事件的发生频率与其造成损失的大小之乘积. 据此, 饮用水中的 THM 所引起的致癌风险 R_{THM} 可用下式来计算:

$$R_{\text{THM}} = \int_0^{+\infty} f(C) \cdot P_c(C) dC \quad (5)$$

式中, $f(C)$ 是饮用水中 THM 浓度的概率密度, 可由概率分布求出.

村野和柴岛两取水口的 THMP 概率分布已于前节求得. 由于通常的净水处理过程可除去原水中 THMP 的 10% ~ 40%, 在此为简便计, 假定原水中 30% 的 THMP 在净水中被除去, 其余 70% 与氯气反应生成 THM. 据此, 可按式(5)用数值积分计算出饮用水中 THM 的致癌风险, 乘以供水人口后的致癌风险如表 2 所示.

表 2 饮用水中 THM 的致癌风险

水 厂	内插依据	方 案			
		现状	方案 1	方案 2	方案 3
村野	住友公式	2.26	2.20	2.26	2.28
	EPA 指南	10.54	10.29	10.54	10.64
柴岛	住友公式	2.03	2.05	1.90	1.45
	EPA 指南	9.50	9.60	8.87	6.73

3.3 THM 致癌风险评价

从表 2 的结果可知, EPA 的数据内插风险值是住友公式估算风险值的 5 倍左右. 现状条件下用住友公式估算的村野和柴岛的致癌风险分别为 2.26 人/a 和 2.03 人/a. 考虑到供水人口, 这个数值不算高. 方案 1 只能使村野的风险稍有降低, 而使柴岛的风险略有增加. 方案 2 可使柴岛的风险降低 6.5%, 比方案 1 效果好些, 但仍不显著. 方案 3 则可使柴岛的风险降低 29% 左右, 是效果较好的方案, 但由于取水后使宇治川流量减少, 使得污染较严重的桂川河水容易扩散至村野取水口, 令该处风险略为上升.

4 THM 的环境风险控制和管理

THM 的环境风险控制和管理主要有三个途径. 一个是在净水处理中减少、抑制或防止 THM 的产生, 这包括在传统的净水处理流程前增加一个生物预处理工序, 部分除去原水中的 THMP; 或设置电脑程序对氯气添加量进行严格实时控制, 防止过量注入而导致 THM 生成量增加; 或在砂过滤之后再作活性炭过滤以除去生成的 THM; 或改变传统的净水工艺流程, 以臭氧代替氯气作杀菌消毒剂, 达到完全避免 THM 生成的目的. 另一个途径是降低水源水体中的 THMP 含量, 包括通过对生活污水和工业废水的治理来削减 THMP 排出量, 实施非点源污染控制对策来降低降雨流入水源的 THMP 负荷量. 第三个途径是改变水源,

将取水口转移到较清洁的河流. 由于改变传统的净水工艺流程和取水口转移花费巨大, 且往往受到客观条件的制约而不易实施, 因此, 当 THM 污染问题不太严重时, 应从加强净水处理效率, 严格控制氯气添加量以及实施以削减污染物排放量为主的流域水环境综合治理这几方面着手, 控制和降低由 THM 引起的环境风险.

参 考 文 献

- 1 Rook J J. Formation of haloforms during chlorination of natural water. *Water Treatment and Examination*, 1974, 23: 234
- 2 丹保宪仁. 水道与 THM. 东京: 技报堂出版社, 1983
- 3 日本土木学会水质研究小委员会. 公共用水域的有机氯化物发生机理及除去研究报告书. 东京: 土木学会, 1981
- 4 大阪市水道局水质试验所. 水源中的 THM P 调查. 大阪市水道局水质试验所调查报告及试验结果, 1983, 33: 249
- 5 Yotsukura N, Sayre W W. Transverse mixing in natural Channels. *Water Resources Research*, 1976, 12(4): 695
- 6 李适宇, 八木俊策, 末石富太郎. 淀川的水质扩散及其对饮用水源的影响. 第 31 次水理讲演会论文集, 1987, 311
- 7 住友恒. 上水道氯气消毒的安全性评价. 水道协会杂志, 1983, 52(3): 11
- 8 U S EPA. Statement of basis and purpose for an amendment to the national- interim primary drinking water regulations on trihalomethanes. Washington D C: Office of Water Supply, 1978

Environmental Risk Assessment in River Quality Management

Li Shiyu^{*} *Tohru Morioka*

Abstract Three management alternatives are proposed for the purpose of improving the water quality of drinking water supply sources in the Yodo River, Japan. THMP levels at two major intakes are calculated with the Cumulative Discharge Model. Carcinogenic risk of THM in drinking water which forms in the chlorination process of water purification is estimated by employing two different interpolation methods. The risk is evaluated and the effect of alternatives is discussed.

Keywords river quality management, THM, risk assessment

^{*} Institute of Environmental Science, Zhongshan University, Guangzhou 510275.