

• 城镇给排水 •

天津开发区净水厂三期工程紫外线消毒系统应用研究

聂雪彪¹ 刘文君¹ 何凤华²

(1 清华大学环境学院, 北京 100084; 2 天津泰达自来水公司, 天津 300457)

摘要 天津开发区净水厂三期工程采用紫外线联合氯消毒工艺, 对主要工艺出水及管网水进行检测, 未检出隐孢子虫、贾第鞭毛虫、冠状病毒和腺病毒; 出厂水及管网水中总大肠菌群、菌落总数、HPC(Heterotrophic bacteria count, 异养菌计数), 以及溴酸盐、卤乙酸、三卤甲烷等理化指标均达到相关标准要求; 紫外线反应器进水 UVT(UV transmittance, 紫外透光率)较高时(如 UVT=95%), 可降低紫外线消毒设备功率; 联合消毒的加氯量经初步探究有一定的降低空间。

关键词 饮用水 紫外线联合氯消毒 微生物安全性 消毒副产物 加氯量

Application study on UV disinfection system in the third stage project of Tianjin development zone Water Treatment Plant

Nie Xuebiao¹, Liu Wenjun¹, He Fenghua²

(1. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Tianjin TEDA Water Supply General Company, Tianjin 300457, China)

Abstract: The UV—chlorine disinfection process was employed in the third stage project in Tianjin development zone water treatment plant. The production water and pipe—network water were tested, and the results showed: Cryptozoite, Giardia, coronavirus and adenovirus were not found; the coliform, total plate count, HPC (Heterotrophic bacteria count), bromate, haloacetic acids, and trihalomethanes in production water and pipe-network water all met the standards; when UVT (UV transmittance) in UV disinfection reactor was relatively high (UVT=95%), the power of UV disinfection equipment could be lowered; there was still some space for the decrease of chlorine dosage in the UV-chlorine disinfection process.

Keywords: Drinking water; UV-chlorine disinfection; Microorganism safety; Disinfection by-products; Chlorine dosage

0 前言

天津开发区净水厂位于天津市滨海新区核心区西北侧, 总设计产水能力 32.5 万 m³/d, 分三期建设。其中一、二期工程建成较早, 采用常规处理工艺: 静态混合器、回转隔板絮凝池、斜管沉淀池、虹吸滤池(一期)和 V 型滤池(二期)、氯消毒工艺, 设计产水能力为 17.5 万 m³/d; 随着滨海新区经济快速发展的需要, 新建三期工程于 2009 年 7 月建成通水, 设计产水能力为 15 万 m³/d, 三期工艺流程见图 1。

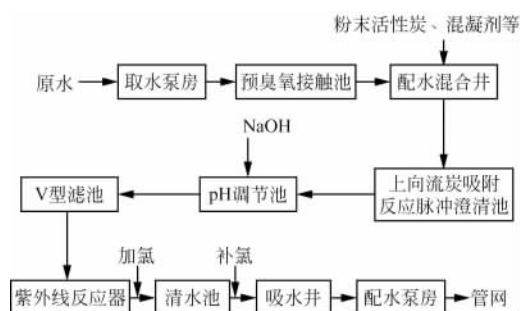


图 1 天津开发区净水厂三期工艺流程

紫外线消毒具有高效性、广谱性,以及在常规消毒剂量范围内不产生副产物等优点,特别是对抗氯性的“两虫”(隐孢子虫和贾第鞭毛虫)有显著的消毒效果,近几年在欧美地区应用实例迅速增加。但是紫外线消毒没有持续的消毒效果,实际使用中为维持管网的生物稳定性需与氯消毒等化学消毒法联合使用。

天津开发区水厂三期工程采用紫外线联合氯的消毒方式,是国内首家紫外线消毒系统与主体工艺同时设计、同时投入运行的净水厂,具有一定的示范意义,紫外线反应器的相关参数见表 1。

表 1 三期工程紫外线反应器(4 台)参数

反应器型号	总功率 /kW	灯管数 /支	处理量 /m ³ /h	灯管寿命 /h	光电转化 效率/%	剂量 /mJ/cm ²
Swift—6L30	70.5	6	3 125	>9 000	>15%	>40

本研究对三期工程运行后的多项指标进行检测,对紫外线联合氯消毒的效果进行评价,并从减少紫外线反应器电耗和减少氯投加量两个角度对该工艺进行优化研究。

1 试验方案

三期工程的进水主要为地表水,包括两种地表水源即引滦入津工程的滦河水、引黄入津工程的黄河水,地下岳龙水仅用于对前两种水源的补充。4 台紫外线反应器中 3 台用于处理地表水(2 备 1 用),1 台用于处理地下岳龙水。

本研究共进行了 4 次取样分析(见表 2),主要的取样点为表 3 中的 1~6 号。第 4 次取样加入一个距净水厂出水口 10 km 处的取样点,以该点为代表对管网末梢水质进行分析。

表 2 取样时间及水源

项目	取样时间	水源
取样 1	2010 年 8 月	滦河水
取样 2	2010 年 9 月	滦河水
取样 3	2011 年 2 月	黄河水
取样 4	2011 年 4 月	滦河、黄河混合水

三期工程设计之初即以 2006 年颁布的《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)^[1](以下简称“新标准”)为基准进行工艺选择与设计。本研究从“新标准”中选取了多项指标进行检测,并加入了 HPC(Heterotrophic bacteria count,异养菌计

数)、溴离子、遗传毒性、三卤甲烷(trihalomethanes, THMs)、卤乙酸(haloacetic acids, HAAs)等指标的检测。

表 3 取样点分布

编号	取样点	简称
1	工艺进水	水源水
2	V 型滤池出水	滤后水
3	紫外线消毒出水	UV 出水
4	加氯后出水,即清水池进水	加氯出水
5	三期工程出厂水	出厂水
6	距水厂出水口 6 km 处管网点	管网点
7	距水厂出水口 10 km 处管网点	管网点(末)

2 检测仪器与方法

总大肠菌群检测采用滤膜法,菌落总数、HPC 采用倾注平板法;

溴离子、溴酸盐:DIONEX ICS3000 离子色谱;

DBPs(Disinfection by — products,消毒副产物):HAAs 经微量液相萃取加衍生化方法前处理、THMs 经正戊烷液相萃取前处理^[2],后用 Agilent 6890N 气相色谱检测;

余氯:哈希便携式余氯仪 Pocket Colorimeter II;

TOC:岛津 TOC—VCPH 检测仪;

病毒检测:Eppendorf Mastercycler PCR system^[3]。

3 检测结果

3.1 微生物学指标

本研究检测了三项传统微生物学指标,有“新标准”中规定的总大肠菌群(标准限值 100 mL 不得检出)、菌落总数(标准限值 100 CFU/mL)和美国 EPA 规定的 HPC(标准限值 500 CFU/mL)。由表 4 可知,经紫外线消毒后的各取样点,三项指标均达标准;在经紫外线消毒后 HPC 指标仍有一定数值的检出,但是经加氯消毒后降至为零或接近零。

对取样 1 和取样 2 的两种病毒进行了检测,即水中常见的轮状病毒和对紫外线有较强抗性的腺病毒。这两种病毒从水源水到管网水均未检出。对取样 3 有较强抗氯性的“两虫”(即隐孢子虫和贾第鞭毛虫)进行了检测,取样点包括水源水、滤后水、UV 出水、管网点,均未检出。通过以上指标的分析,可

表 4 三项传统微生物指标检测结果

指标	项目	取样 1	取样 2	取样 3	取样 4
总大肠菌群/ CFU/ 100 mL	水源水	32 300	26 450	100	4 000
	滤后水	5 440	6 700	0	235
	UV 出水	0	0	0	0
	加氯出水	0	0	0	0
	出厂水	0	0	0	0
	管网点	0	0	0	0
	管网点(末)				0
菌落总数 /CFU /mL	水源水	960	940	44	2 667
	滤后水	640	4 494	0	1 000
	UV 出水	0	31	0	4
	加氯出水	0	0	0	0
	出厂水	2	0	0	0
	管网点	0	0	0	0
	管网点(末)				0
HPC /CFU /mL	水源水	7 000	5 167	16 000	21 300
	滤后水	18 000	94 533	45 000	148 000
	UV 出水	21	80	157	91
	加氯出水	0	0	0	2
	出厂水	0	1	1	2
	管网点	11	109	3	10
	管网点(末)				7

以认为针对三期工程的水质特征,紫外线联合氯消毒工艺可以保证微生物学安全性。

3.2 常规理化指标

3.2.1 余氯

“新标准”中规定“当采用氯气及游离氯制剂为消毒剂时,出厂水中余氯不低于 0.3 mg/L,管网末梢水中不低于 0.05 mg/L”。四次取样检测结果见图 2。管网末梢点中的管网水为一、二、三期工程出水等多种出水的混合水,其余氯值明显高于“新标准”中规定的最低限值(0.05 mg/L);三期出厂水中余氯明显高于 0.3 mg/L,说明三期工程实际加氯量有一定降低的空间。

3.2.2 溴离子与溴酸盐

天津开发区净水厂临近渤海湾,同时,引滦入津沿线的四座水库中均有溴离子检出,由于三期工艺采用预臭氧处理,因此有生成溴酸盐的风险。溴酸盐为潜在致癌物(“新标准”限值 0.01 mg/L),有必要对这两项指标进行检测。取样 2 对溴离子和溴酸

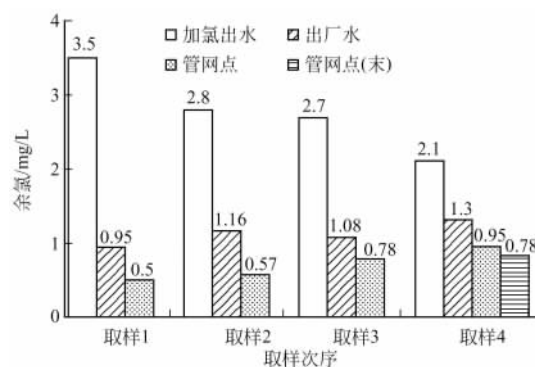


图 2 主要取样点余氯值

盐进行了检测,结果见表 5。各取样点溴酸盐检出值均符合标准规定,说明针对滦河水水质臭氧预处理不会产生溴酸盐风险。

表 5 取样 2 溴离子与溴酸盐检测结果

取样点	Br ⁻ /μg/L	BrO ₃ ⁻ /μg/L
水源水	125	ND
滤后水	122.5	ND
UV 出水	126.5	ND
加氯出水	109.5	5.6
出厂水	52.3	5.7
管网点	54.5	ND

注:ND 为未检出。

3.2.3 有机物指标 TOC 与 AOC

地表水中通常含有较多的天然有机物(NOM),一方面有些 NOM 是生成氯化消毒副产物的前体物,另一方面,水中过多的有机物为管网中的微生物提供了能量与营养来源,构成了对管网生物稳定性的威胁。对 TOC 与 AOC(assimiable organic carbon,生物可同化有机碳)两项指标的检测结果见表 6,其中 AOC 指示了有机物中最容易被微生物所利用的部分,有研究认为在有余氯的情况下 AOC 低于 100 μg/L 可维持管网的生物稳定性^[4,5];本课题组前期研究认为,当管网水 AOC 低于 15 μg/L 时,单独紫外线消毒可维持管网的生物安全性,当管网水 AOC 为 100~200 μg/L 时,管网余氯需要控制在 0.5 mg/L 以上。

由表 6 检测结果可知,紫外线消毒对 AOC 浓度没有影响;出厂水和管网水中的 AOC 浓度均未超过 100 μg/L,因此管网点中余氯值可不高于 0.5 mg/L。

表 6 TOC、AOC 检测结果

取样点	AOC/ $\mu\text{g/L}$		TOC/ mg/L		
	取样 3	取样 4	取样 1	取样 2	取样 4
水源水	95.6	83.6	3.03	2.4	2.65
滤后水	62.7	34	1.18	0.94	1.18
UV 出水	56.9	44.2	2.17	1.12	1.29
加氯出水	78	46.5	1.92	1.44	1.75
出厂水	68.2	27.8	1.88	1.22	0.73
管网点	70.8	47.3	1.72		1.24
管网点(末)		46			1.69

3.3 氯化消毒副产物与遗传毒性

THMs 与 HAAs 是典型的氯化消毒副产物,具有致癌特性,美国 EPA 规定饮用水中两种副产物的限值分别为 $80 \mu\text{g/L}$ 和 $60 \mu\text{g/L}$ ^[6]。本研究检测结果见表 7、表 8。可见,紫外线消毒对 THMs 与 HAAs 浓度均无明显影响,而加氯出水和出厂水由于氯消毒的作用两类副产物的浓度明显增加。

表 7 THMs 检测结果

取样编号	取样 1	取样 2	取样 3
水源水	6.3	ND	ND
滤后水	ND	ND	4.0
UV 出水	5.3	ND	7.0
加氯出水	9.8	18.4	8.9
出厂水	15.8	27.6	22.7
管网点	29.0	47.7	14.1

注:表中数值单位为 $\mu\text{g/L}$ 。

表 8 HAAs 检测结果

取样编号	取样 1	取样 2	取样 3
水源水	0.7	4.9	1.7
滤后水	0.7	4.9	1.9
UV 出水	0.6	4.9	1.6
加氯出水	6.5	12.8	4.1
出厂水	17.9	25.3	5.5
管网点	17.1	22.2	3.5

注:表中数值单位为 $\mu\text{g/L}$ 。

由表 5、表 7、表 8 可知,取样 2 中加氯出水后溴离子浓度逐渐降低,而 DBPs 生成量呈增加趋势,分析溴离子浓度与 HAAs、THMs 中溴元素含量的相关性(均以 $\mu\text{mol/L}$ 表示),如图 3 所示。相对于加氯出水,出厂水和管网点中溴离子明显降低,同时 HAAs 和 THMs 中所含溴元素明显增加,其增量占溴离子减少量的 20% 以上,说明含溴消毒副产物中

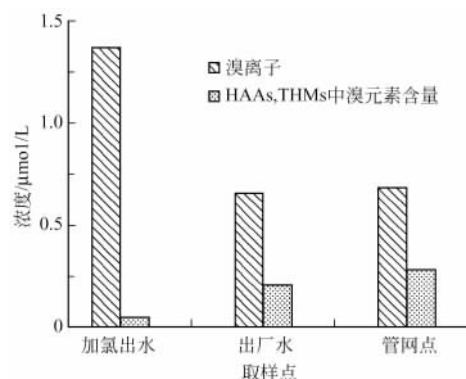


图 3 溴离子与 HAAs、THMs 中溴元素浓度变化

的溴元素主要来自于溴离子。

遗传毒性是通过检测 DNA 损伤程度以反映多种物质协同作用下综合毒性的一种指标。本课题组前期研究结果显示,紫外线消毒可引起遗传毒性升高,并存在一定剂量效应,但常规剂量下(如 40 mJ/cm^2)遗传毒性仅略有升高,而氯消毒会引起遗传毒性明显升高。各取样点遗传毒性见表 9,对比滤后水、UV 出水和出厂水的遗传毒性,紫外线消毒使遗传毒性略有增加,出厂水遗传毒性增加明显。

表 9 各取样点遗传毒性

取样点	以 4-NNO 当量表示的遗传毒性/ ng/L		
	取样 2	取样 3	取样 4
原水	44.1	87.2	53.7
滤后水	50.3	71.5	60.5
UV 出水	66.2	89.8	81.4
三期出厂	138.5	149.5	130.3
管网点	84.9	98	165.8
管网点(末)			122.1

3.4 紫外线消毒的必要性与优化研究

为分析紫外线消毒的必要性,本研究在关闭了紫外线消毒设备后,对加氯出水和出厂水的微生物学指标进行了检测(见表 10,“单加氯”表示关闭紫外线设备后的加氯出水)。关闭紫外线消毒后,虽然出厂水仍满足要求,但加氯出水检出了更高的总大肠菌群和 HPC,说明水中对氯具有一定抗性的细菌可通过紫外线消毒加以灭活。

三期工程紫外线消毒设施通过人工设定进水 UVT(UV transmittance,紫外透光率)值的方式调

表 10 不同 UV 剂量下水样微生物检测结果

指标	项目	取样 1	取样 2	取样 3	取样 4
总大肠菌群 /CFU /100 mL	UV 出水	0	0	0	0
	加氯出水	0	0	0	0
	出厂水	0	0	0	0
	单加氯	23	1	0	0
	出厂水(关闭 UV)	0	0		
	UV 出水(调)	0	0		
	加氯出水(调)	0	0		
菌落总数 /CFU /mL	UV 出水	0	31	0	4
	加氯出水	0	0	0	0
	出厂水	2	0	0	0
	单加氯	2	2	0	
	出厂水(关闭 UV)	2	0	0	
	UV 出水(调)	0	18		
	加氯出水(调)	0	0		
HPC /CFU /mL	UV 出水	21	80	157	91
	加氯出水	0	0	0	2
	出厂水	0	1	1	2
	单加氯	0	3	4	6
	出厂水(关闭 UV)	0	0		
	UV 出水(调)	26	70		
	加氯出水(调)	0	1		

节输出功率,设定值越低,为保证足够的紫外辐照剂量(目标剂量 40 mJ/cm^2),反应器会增加输出功率。日常运行过程中的 UVT 设定值为 90%。取样 1 和取样 2(水源水均为滦河水)对水样的 UVT 进行了检测(见表 11),紫外线反应器进水实际 UVT 为 95%,此时保持人工设定 UVT 为 90%,实际剂量将为 60 mJ/cm^2 ,可以考虑减少功率以降低能耗。

表 11 水样 UVT 检测值

取样点	取样 1 UVT/%	取样 2 UVT/%
水源水	84.3	86
滤后水	94.5	95
UV 出水	95.6	95
加氯出水	94.6	95
出厂水	95.1	95
管网点	94.8	95

将 UVT 输入值调整为 95%后对水样微生物学指标进行了检测,见表 10。调整前后三种微生物学指标无明显区别,均符合要求,为降低反应器运行能耗提供了依据。经测算,UVT 设定为实际进

水的 95%时,其耗电与保持设定为 90%相比,可降低 20%~50%。

3.5 降低氯耗的可行性分析

由以上分析可知,三期工程出厂水及管网点微生物学指标满足要求,余氯值明显高于“新标准”中的规定,同时,AOC 浓度低于 $100 \mu\text{g/L}$,说明管网余氯值可低于 0.5 mg/L ,这些都说明可以适当降低实际加氯量,以减少氯化消毒副产物的生成。

本研究通过氯耗试验初步探究了该工艺减少加氯量的可行性。三次氯耗试验的结果如图 4~图 6 所示,初始加氯量均在 $2.0 \sim 2.5 \text{ mg/L}$,与实际加氯量接近。首先,紫外线消毒并没有改变水体的耗氯特性;其次,三次氯耗试验在加氯 24 h 后余氯均大于 0.3 mg/L ,其中取样 3 的试验在加氯 48 h 后仍保持余氯在 0.3 mg/L 以上。

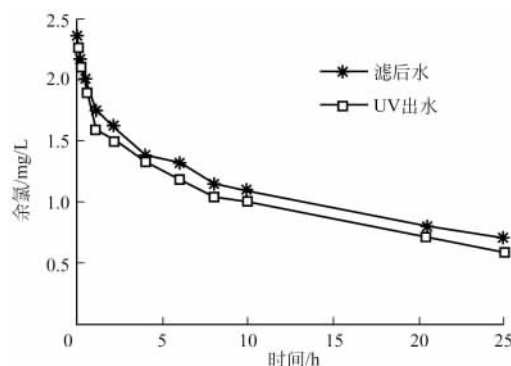


图 4 取样 2 氯耗曲线

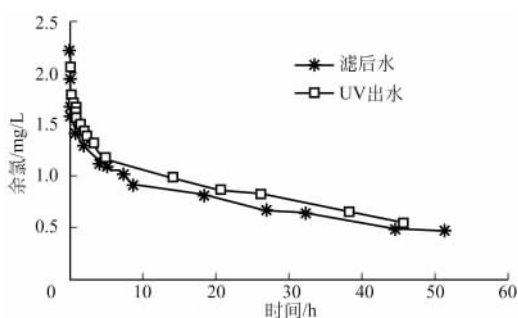


图 5 取样 3 氯耗曲线

对取样 4 UV 出水投加三种不同浓度氯消毒剂 (1.2 mg/L 、 1.8 mg/L 、 2.5 mg/L)进行对比(见图 7)。初始加氯 1.2 mg/L 时,24 h 后余氯为 0.08 mg/L ;初始加氯 1.8 mg/L 时,24 h 后余氯为 0.14 mg/L 。考虑到实验室模拟氯耗速度可能会低于实际管网氯耗速度,认为三期工程最佳加氯量与 1.8 mg/L 相

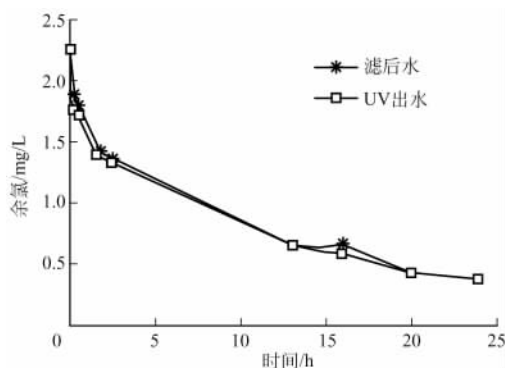


图6 取样4氯耗曲线

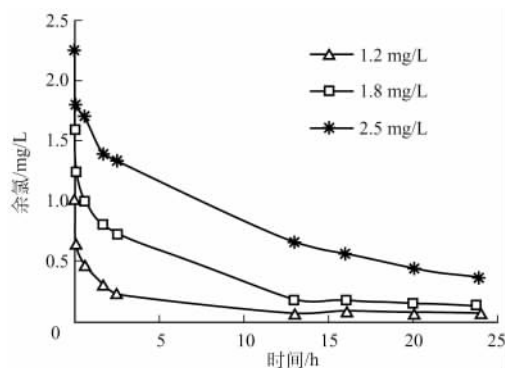


图7 取样4不同加氯量氯耗曲线

近,但仍需进一步验证。三种加氯量条件下分别在加氯后0.5 h、2.5 h、13 h进行HPC检测,检出值均为0或接近0(1 CFU/mL、2 CFU/mL),说明三期工程紫外线联合氯消毒可以充分保证对微生物的灭活效果,并且仅需少量余氯便可抑制微生物的复活,但由于实际管网管壁生物膜可为微生物提供保

护和微营养环境,所需余氯要高于实验室模拟中所需的余氯含量。

4 结语

天津开发区净水厂三期工程紫外线消毒具有较高消毒效率,且几乎不产生副产物;紫外线联合氯消毒的方式可以保证消毒效果并维持管网的生物稳定性;根据水质透光率维持实际UV剂量为 $40 \text{ mJ}/\text{cm}^2$ (目标剂量),可以减少电耗;紫外线联合氯消毒不能减少耗氯量,但相对于单独氯消毒,可以减少维持管网生物稳定性的余氯量。

参考文献

- 1 GB 5749—2006 生活饮用水卫生标准
- 2 刘文君,贺北平,曹莉莉,等. 饮用水中消毒副产物卤乙酸(HAAs)测定方法研究. 给水排水,2004,30(8): 38~41
- 3 Haramoto E, Katayama H, Ohgaki S. Detection of noroviruses in tap water in Japan by means of a new method for concentrating enteric viruses in large volumes of freshwater. Appl Environ Microb, 2004, 70:2154~2160
- 4 王迪,刘文君,顾军农,等. 可同化有机碳及氯浓度对给水管网中生物膜生长的影响. 给水排水,2008,34(2):19~22
- 5 LeChevallier M W. Coliform regrowth in drinking water: a review. J AWWA, 1990, 82(11):74~86
- 6 USEPA. National Primary Drinking Water Regulations: Stage 2 disinfectants and disinfection byproducts rule; final rule. 2006

○ E-mail:nxb04@mails. tsinghua. edu. cn

收稿日期:2011-05-27

修回日期:2011-05-29

“十二五”期间兰州将投入9.6亿元治理水污染

2010年起,兰州市全面实施了黄河兰州段综合治理项目,兰州市多年来持续开展水源环境违法行为清理整治,不断加大饮用水源保护力度。2000年以来,兰州市饮用水水源达标率100%。随着近年不断地坚持治理,兰州市将继续强化目标考核,把水污染防治和饮用水源保护纳入各县区政府和政府有关部门综合考核评价的重要内容,实行“一票否决”和问责追究。加强对突发环境事故的处置,不断提高应急能力,确保黄河兰州段水环境安全。同时,环保部门将继续采取定期检查和抽查相结合的方法,对

重点排污企业、污水处理厂、一般企业和黄河兰州段干流、支流及排洪沟等进行定期检查或抽查;继续开展水环境安全大检查,重点对黄河干流兰州段及其主要支流,兰州段沿线的大中型企业,开展拉网式检查,以便及时发现问题及时整改。

此外,“十二五”期间,兰州市在水污染防治方面计划投资9.61亿元,重点建设兰州市城市生活饮用水一级水源保护区、兰州新区污水处理厂和彭家坪污水处理厂等3个项目。