

杨勇, 魏源送, 郑祥, 等. 2012. 北京温榆河流域微生物污染调查研究[J]. 环境科学学报, 32(1): 9-18

Yang Y, Wei Y S, Zheng X, et al. 2012. Investigation of microbial contamination in Wenyu River of Beijing[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 32(1): 9-18

## 北京温榆河流域微生物污染调查研究

杨勇<sup>1,2</sup>, 魏源送<sup>1</sup>, 郑祥<sup>2,\*</sup>, 王亚炜<sup>1</sup>, 于森<sup>1,2</sup>, 肖庆聪<sup>1,2</sup>, 郁达伟<sup>1,2</sup>, 孙翀<sup>2</sup>, 杨焜<sup>2</sup>,  
高丽娟<sup>3</sup>, 白羽<sup>3</sup>, 陈尔凝<sup>3</sup>

1. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085

2. 中国人民大学环境学院, 北京 100872

3. 北京市理化分析测试中心, 北京 100089

收稿日期: 2011-04-16

修回日期: 2011-07-25

录用日期: 2011-08-05

**摘要:** 随着工业化和城市化进程的加快, 我国河流普遍受到了不同程度的水质污染, 而微生物指标对于水质评价具有重要作用. 本研究选取细菌总数、总大肠菌群、粪大肠菌群以及 SC 噬菌体、F 噬菌体作为指示微生物对北京市温榆河开展了历时一年多的调查研究, 结果表明, 除了有机污染和富营养化问题外, 温榆河流域的微生物污染非常突出. 温榆河上游已经受到了一定程度的微生物污染, 微生物浓度(以粪大肠菌群为例)波动较大( $5.01 \times 10^2 \sim 5.37 \times 10^6$  个  $\cdot L^{-1}$ ); 下游受清河、坝河等排水河道的影响, 微生物污染普遍严重(均值达  $6.3 \times 10^6$  个  $\cdot L^{-1}$  以上), 与地表水 V 类水质标准(GB 3838—2002)相比 FC 浓度平均超出两个数量级. 统计分析显示, 温榆河微生物污染受季节的影响并不显著( $p > 0.05$ ), 表明人为因素很可能是其主要影响因素. 温榆河处于微生物高污染水平, 可能威胁地下水水质和农作物质量安全, 应从源头加强微生物风险控制.

**关键词:** 河流; 微生物污染; 温榆河

文章编号: 0253-2468(2012)01-09-10

中图分类号: X522

文献标识码: A

## Investigation of microbial contamination in Wenyu River of Beijing

YANG Yong<sup>1,2</sup>, WEI Yuansong<sup>1</sup>, ZHENG Xiang<sup>2,\*</sup>, WANG Yawei<sup>1</sup>, YU Miao<sup>1,2</sup>, XIAO Qingcong<sup>1,2</sup>, YU Dawei<sup>1,2</sup>, SUN Chong<sup>2</sup>, YANG Ye<sup>2</sup>, GAO Lijuan<sup>3</sup>, BAI Yu<sup>3</sup>, CHEN Erning<sup>3</sup>

1. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085

2. School of Environment and Natural Resources, Renmin University of China, Beijing 100872

3. Beijing Centre for Physical & Chemical Analysis, Beijing 100089

Received 16 April 2011;

received in revised form 25 July 2011;

accepted 5 August 2011

**Abstract:** Along with industrialization and urbanization, rivers in China have been widely polluted. Microbial indicators generally play an important role in water quality assessment. Total number of bacteria, total coliforms, fecal coliforms, and somatic coliphages and F phages were chosen as indicative microorganisms in this study for assessing water quality of Wenyu River in Beijing. Results of the survey for more than one year showed that microbial contamination in Wenyu River was rather serious, with significant organic pollution and eutrophication. The upstream of Wenyu River, with water quality fluctuating sharply, suffered from microbial contamination. Different from the upstream, the microbial pollution in the downstream of Wenyu River was also serious which was mainly affected by the branches such as Qing River and Ba River. The average levels of its microbial indicators were twice order of magnitude higher than Grade V of the surface water quality standard (GB 3838—2002) of China. Statistic analysis showed that the microbial contamination of Wenyu River was not significantly influenced by seasonal factors ( $p > 0.05$ ), which implied anthropogenic factors were the main causes. Compared with other rivers in China and abroad, microbial contamination of Wenyu River was more serious, which may pose potential threats to the groundwater and crops, thus it was necessary to pay more attention to the prevention and control of microbial risk in the river.

**Keywords:** river; microbial contamination; Wenyu River

**基金项目:** 国家水体污染控制与治理科技重大项目(No. 2009ZX07209-005); 北京科技新星(No. 2008A110); 中国人民大学科学研究基金(中央高校基本科研业务费专项资金资助)项目

**Supported by** the National Major Science and Technology Program for Water Pollution Control and Treatment (No. 2009ZX07209-005), the Beijing Science & Technology Star Plans (No. 2008A110) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities and the Research Funds of Renmin University of China

**作者简介:** 杨勇(1985—), 男, E-mail: trojanyang@163.com; \* 通讯作者(责任作者), E-mail: zhengxiang7825@hotmail.com

**Biography:** YANG Yong (1985—), male, E-mail: trojanyang@163.com; \* **Corresponding author**, E-mail: zhengxiang7825@hotmail.com

## 1 引言 (Introduction)

世界上许多河流、湖泊等在地区经济快速发展时期都出现了水质污染和生态退化,如英国的泰晤士河、欧洲的莱茵河、美国的特拉华河和波托马克河以及日本的琵琶湖等(温东辉等,2007). 根据2009年中国环境状况公报,我国各大水系受到了不同程度的污染,其中以海河水系最为严重. 然而,目前我国的河流水质评价指标体系主要以常规理化指标为主,甚少考虑微生物评价指标,而且《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)仅规定了大肠菌群的浓度指标. 例如,以常规理化指标作为评价指标,2003年三峡水库区以Ⅲ类水质为主,但若考虑粪大肠菌群等微生物指标,则水质总体为Ⅳ类和Ⅴ类(吕怡兵等,2007). 国外研究指出,40%的河流及河口水质的水质难以达到水环境标准是由于病原微生物所致(James *et al.*, 2004). 显而易见,为了更好地促进河流水质管理,今后我国应采用理化指标和微生物指标全面评价河流水质.

水体中指示微生物主要分为指示菌和病毒指示物,常见的指示菌为细菌总数(TB, total number of bacteria)、总大肠菌群(TC, total coliforms)、粪大肠菌群(FC, fecal coliforms)以及粪链球菌、大肠埃希氏杆菌等,病毒指示物包括SC噬菌体、F-RNA噬菌体、脆弱拟杆菌噬菌体以及人类肠道病毒如脊髓灰质炎病毒等(刘芳等,2007). 然而,迄今为止我国缺乏对河湖水体中的病原或指示微生物进行长期而系统的调查研究,仅有少数的几篇相关文献报道(Hu *et al.*, 2008; 方肇寅等,1992; 刘永军等,2007; 施嘉琛等,2008; 宋燕燕等,1991; 张楚瑜等,1991; 张甲耀等,1992; 赵淑敏等,1998). 因此,本文以北京市温榆河流域为调查对象,从指示菌和病毒指示物两方面入手,分别选取细菌总数、总大肠菌群、粪大肠菌群、SC噬菌体、F噬菌体等作为指示微生物,通过为期一年多的现场采样调查,分析温榆河的微生物污染时空现状,以期为今后河流的水质评价和微生物污染控制提供科学依据.

## 2 材料与与方法 (Materials and methods)

温榆河为北京市五大水系中唯一发源于境内的河流,发源于燕山南麓,起自昌平区沙河闸,流经昌平、顺义、朝阳和通州四区,至北关拦河闸,全长47.5 km,流域面积2478 km<sup>2</sup>,主要支流有藕沟河、

清河、龙道河、坝河和小中河等(王劭勇等,2006).

本研究重点调查研究了温榆河干流及其重要支流清河和龙道河综合集成示范区,其中龙道河是国家“十一五”重大科技专项(No. 2009ZX07209-005)综合集成示范区的核心区域. 调查分为常规调查和重点入河排水口调查,其中常规采样点分布如图1所示,采样时间于2009年10月至2010年12月,采样频率为每月1次;2010年7月—9月,在温榆河干流(沙河闸至北关闸)入河污染负荷普查的基础上,对其中的8个重点入河排水口进行了24h连续监测. 除了常规的理化指标分析,同时分析了细菌总数、总大肠菌群、粪大肠菌群和SC噬菌体、F噬菌体等指示微生物.

指示菌的检测主要采用单层琼脂平板法、多管发酵法等(国家环境保护总局,2007);SC和F噬菌体的检测参照ISO国际标准方法(ISO TC 147/SC4/WG 11, 1995;2000),即采用传统的双层琼脂平板法,宿主菌分别为 *E. coli* CN 和沙门氏菌 WG49,均由清华大学胡洪营教授课题组惠赠. 数据统计分析采用SPSS® 17.0 软件.



图1 温榆河流域河水微生物采样点分布图

注:1)温榆河干流:W01:沙河水库(温榆河起点),W02:温榆河龙道河取水口(龙道河示范工程引水渠),W03:辛堡闸(温榆河清河交汇后),W04:北关闸前(温榆河终点);2)重要支流清河:Q01:清河桥(清河污水处理厂排放口上游),Q02:清河污水处理厂出水,Q03:沙子营(清河汇入温榆河前);3)龙道河综合集成示范区:L01:罗马西湖出水口,L02:罗马东湖出水口,L03:罗马东湖湿地单元 I,L04:罗马东湖湿地单元 II.

Fig. 1 Map of sampling sites in Wenyu River Watershed

## 3 结果 (Results)

### 3.1 常规调查

3.1.1 指示菌 一般认为,水中的细菌总数  $10 \sim 100$  个  $\cdot \text{mL}^{-1}$  时属于极清洁水,  $100 \sim 1000$  个  $\cdot \text{mL}^{-1}$

时为清洁水,  $1000 \sim 10000$  个  $\cdot \text{mL}^{-1}$  时为不太清洁水,  $10000 \sim 100000$  个  $\cdot \text{mL}^{-1}$  时为不清洁水, 多于  $100000$  个  $\cdot \text{mL}^{-1}$  时为极不清洁水(孔繁翔, 2000)。此外, 按照《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002), III、IV和V类水质的粪大肠菌群浓度限值分别为  $10000$ 、 $20000$  和  $40000$  个  $\cdot \text{L}^{-1}$ 。

温榆河干流指示菌的平均浓度分布情况如图2所示, 粪大肠菌群浓度的季度变化和月度变化分别见图3和图4。总体上, 温榆河上游为不清洁水, 微生物浓度波动较大; 温榆河支流清河及温榆河中下游微生物污染普遍严重, 超出V类水质标准两个数量级, 属于极不清洁水; 龙道河综合示范区内的罗

马西湖与东湖的水质相对较好, 属于不太清洁水体, 粪大肠菌群平均浓度低于  $20000$  个  $\cdot \text{L}^{-1}$ , 好于IV类水质。Kruskal-Wallis 检验表明, 不同采样点的指示菌浓度之间存在显著差异 ( $p < 0.01$ ), 但不同月份、季节及水温的指示菌浓度之间不存在显著差异 ( $p > 0.05$ , 见图3和图4), 这是因为除了上游来水以外, 温榆河干流以城市退水和流域分散性污水等非常规水源补给为主, 其中城市退水主要来自城市污水处理厂排水, 分散性污水主要包括中心城区、沿岸新建生活小区、别墅、学校、餐饮业、养殖业和部分小型工业企业等污水, 温榆河流域污水处理率不足  $61\%$  (郑凡东等, 2007), 而且沿途接纳了清河、坝河等以排水功能为主的重度污染支流, 所以, 温榆河水水质受季节等自然因素的影响相对较小。

下文分别对温榆河干流、重要支流清河及龙道河综合集成示范区的微生物污染状况进行深入分析。

#### (1) 温榆河干流

温榆河干流(沙河水库至北关闸)共布设了4个采样点, 其中W01(沙河水库)和W02(温榆河上龙道河取水口)代表温榆河上游的微生物水质状况, W03(温榆河与清河交汇后)和W04(北关闸前)代表温榆河下游的微生物水质状况。温榆河干流上游微生物水质明显好于下游, 而W01与W02之间、W03与W04之间均不存在显著差异 ( $p > 0.05$ ), 不同月份和季节之间的差异不明显 ( $p > 0.05$ )。

W01号采样点的微生物水质波动剧烈(见图3a和图4a), 如2010年2月1日和2010年5月7日的粪大肠菌群浓度分别为  $5400000$  个  $\cdot \text{L}^{-1}$  和  $500$  个  $\cdot \text{L}^{-1}$ , 相差4个数量级。2006年8月的调查(施嘉琛等, 2008)发现, 温榆河上游的总大肠菌群浓度下降较快, 可能是大肠杆菌在自然环境中的存活周期较短。本研究连续一年多的调查表明, 温榆河上游指示菌变化趋势并不稳定, 统计分析表明W01和W02的指示菌浓度之间没有显著性差异 ( $p > 0.05$ ), 这说明微生物并没有稳定衰减, 可能是由于微生物在衰减的同时又有新的污染源汇入, 例如蒗沟河是温榆河上游的重要支流, 由牐牛河、白浪河、钻子岭沟、八家沟于大东流乡小东流村附近汇合而成, 全长  $29$  km, 容易受到沿河两岸村庄分散污水的影响。

W02号与W03号取样点之间有支流清河汇入, 两处微生物水质差异显著 ( $p < 0.05$ ), W03的指示

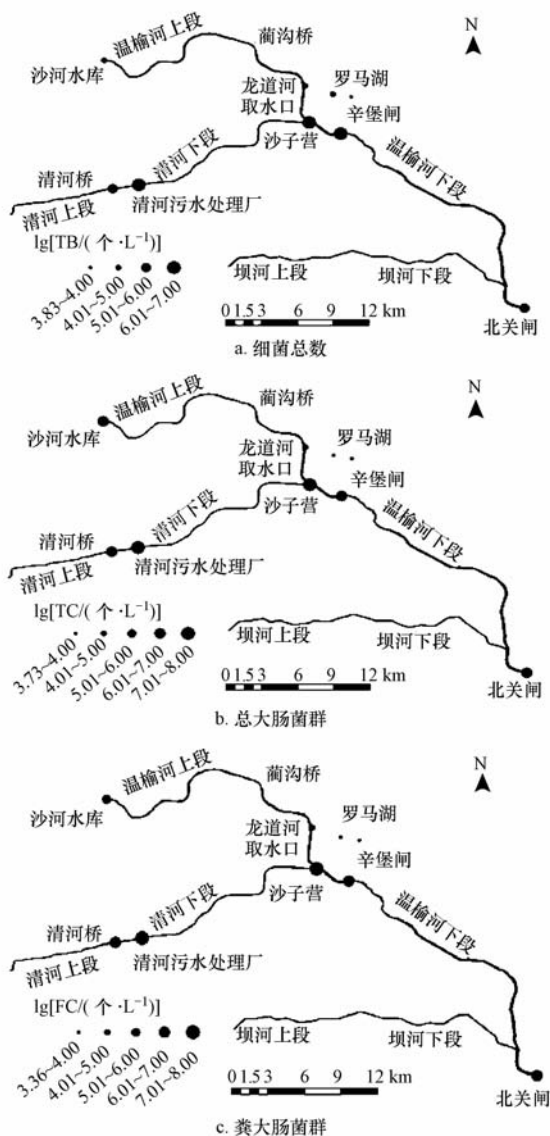


图2 温榆河指示菌的年度平均浓度(2009-10—2010-12)

Fig. 2 Annual average of indicator bacteria concentrations in Wenyu River

菌浓度明显高于 W02. W03 和 W04 的微生物水质波动幅度较小,粪大肠菌群基本均超出 40000 个·L<sup>-1</sup>,属于劣 V 类水质. W03 至 W04 的指示菌浓

度略微呈下降趋势,但不存在显著差异( $p > 0.05$ ),其原因可能与坝河等重度污染支流的汇入和沿岸村庄分散污水的排放有关.

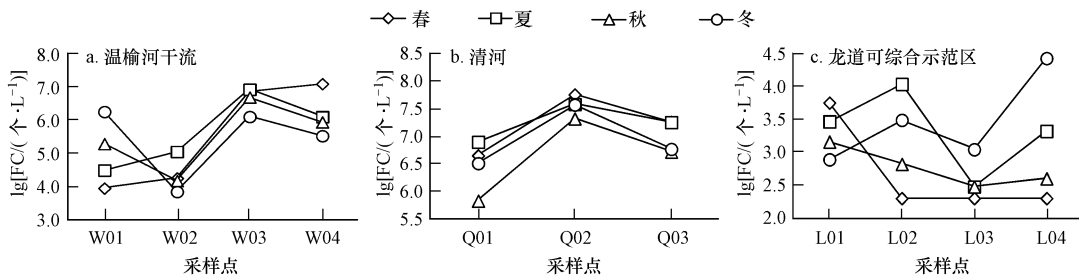


图 3 温榆河干流和支流清河及龙道河的粪大肠菌群浓度季度变化

Fig. 3 Seasonal variations of FC concentrations in the main stream and branch of Wenyu River

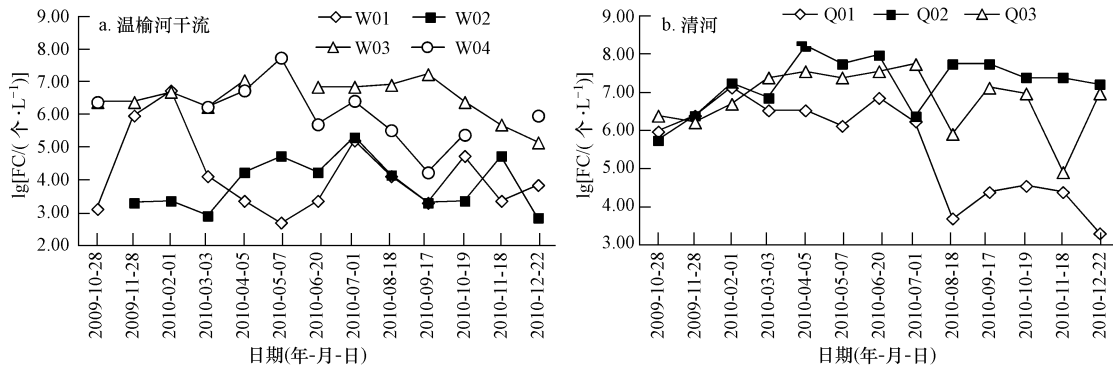


图 4 温榆河干流和支流清河粪大肠菌群浓度的月度变化(2009-10—2010-12)

Fig. 4 Monthly variations of FC concentrations in the main stream and branch of Wenyu River

## (2) 清河

清河发源于海淀区,全长 33 km,是温榆河干流的主要补给水源和重要支流.本研究在清河上布设了 3 个采样点,重点监测了污水处理厂排水对清河及温榆河干流的水质影响.

清河的粪大肠菌群浓度超出 V 类水质标准近两个数量级,表明清河目前遭受了严重的微生物污染,Q01 与 Q02 和 Q03 的指示菌浓度之间均存在显著差异( $p < 0.05$ ),但不同月份和季节下指示菌浓度之间不存在显著差异( $p > 0.05$ ).

清河的主要补给水源为污水处理厂排水和沿岸分散污水,其中肖家河污水处理厂规模为 4 万  $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ ,清河污水处理厂设计处理规模为 40 万  $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ (但实际处理量约 50 万  $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ ),目前清河汇入温榆河的总流量约 55 万  $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ ,折合年流量约 20075 万  $\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ .由于服务区域的人口增长迅速,清河污水处理厂超负荷运行,致使其出水中粪大肠菌群浓度明显超过了《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的三级排放标准

(10000 个·L<sup>-1</sup>),加剧了清河的微生物污染程度.与此同时,与清河交汇之前,温榆河干流(鲁疃闸)的多年平均来水量为 13160 万  $\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ (张永勇等,2009),清河污水处理厂排水量与温榆河干流来水量之比达到了 1.5,那么污水厂排水是温榆河干流的主要补给水源和水污染加剧的主要来源之一.

## (3) 龙道河综合集成示范区

罗马湖属于龙道河的源头,为本课题(No. 2009ZX07209-005)综合集成示范区的核心区域,温榆河水通过引水渠依次进入罗马湖、龙道河,最终汇入温榆河.罗马东湖人工湿地单元 I 处理引自罗马西湖的源水 1400  $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ ,湿地长 86 m × 宽 40 m,采用复合潜流湿地结构:格栅→调节池→渗滤单元→复合垂直流湿地单元→除磷湿地单元→罗马东湖区浅水区;湿地单元 II 处理湖内自循环水 2000  $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ ,长 86 m × 宽 27 m,主要结构为:格栅→调节池→一级生物塘→一级植物碎石床→二级生物塘→二级植物碎石床→挺水植物池(湖区浅水区).本研究重点调查了罗马西湖和罗马东湖人工湿地工

程进出水状况,监测结果如图 2 和图 3c 所示。

与温榆河干流相比,罗马湖微生物浓度基本优于 IV 类水质。同时罗马东湖人工湿地运行效果的监测结果表明,L03(人工湿地单元 I 出水)与 L04(单元 II 出水)均能达到地表水质量 III 级标准( $10000 \text{ 个} \cdot \text{L}^{-1}$ )。由于罗马东湖人工湿地运行周期较短,统计分析结果表明 L01、L02、L03 和 L04 的指示菌浓度之间没有显著差异( $p > 0.05$ )。

**3.1.2 病毒指示物** 本研究主要检测了 SC 噬菌体和 F 噬菌体两种病毒指示物。W01(沙河水库)、W02(温榆河龙道河取水口)、L02(罗马东湖出水)以及 L04(罗马东湖人工湿地 II 出水)SC 噬菌体偶尔有检出,L01(罗马西湖)和 L03(潜流人工湿地)没有检出,表明温榆河上游及罗马湖受到病毒污染的可能性较小。清河与温榆河下游 SC 噬菌体的检出量较高,表明其有可能受到病毒污染。以 2010 年 6 月 13 日的一次检测结果为例(见图 5),Q02 和 Q03 处的 SC 噬菌体浓度明显高于温榆河干流。但由于 F 噬菌体检出量均在  $5 \text{ 个} \cdot \text{mL}^{-1}$  以下,故在今后应研发更为有效的浓缩方法,以提高 F 噬菌体检测的准确性。

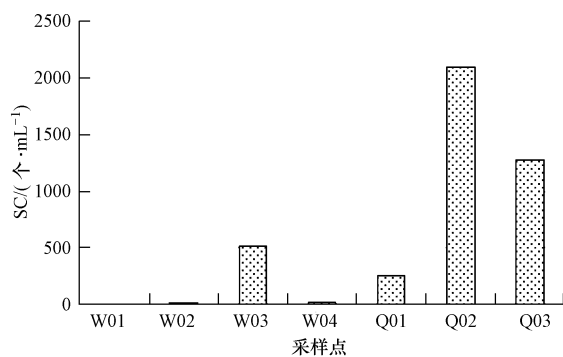


图 5 温榆河和支流清河 SC 噬菌体浓度变化(2010 年 6 月 13 日)

Fig. 5 Variations of SC concentrations in the main stream and branch of Wenyu River on June 13, 2010

### 3.2 重点入河排水口调查

为了摸清温榆河干流的入河污染负荷现状,课题组于 2010 年 7—9 月对温榆河干流沿岸(沙河水库至北关闸)的入河排水口进行了普查,共计 74 个,并对其中 8 个重点入河排水口进行了 24 h 连续监测。指示菌调查结果见图 6,8:00AM 与 8:00PM 时的粪大肠菌群浓度没有显著性差异,其中蔺沟河的微生物污染相对较轻,以 Eff\_06 最为严重,FC 浓度高达  $10^7 \text{ 个} \cdot \text{L}^{-1}$  以上。Eff\_06 排水口出水呈棕褐

色,恶臭明显,调查表明为未经处理的人畜粪便出水,微生物浓度非常高。考虑入河排水量,清河的微生物污染贡献率居于首位。

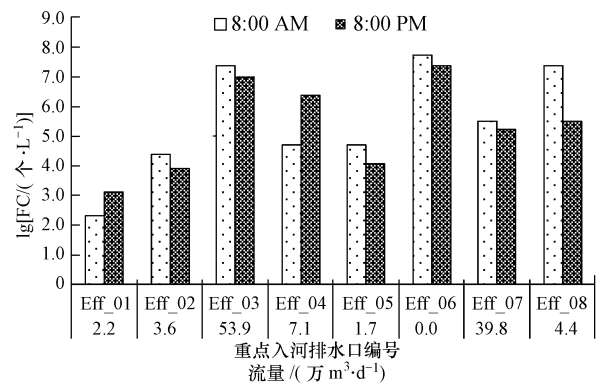


图 6 温榆河重点入河排水口调查-粪大肠菌群

注: Eff\_01 (116°26'28"E, 40°07'48"N, 蔺沟), Eff\_02 (116°29'04"E, 40°06'04"N), Eff\_03 (116°29'22"E, 40°04'41"N, 清河), Eff\_04 (116°35'01"E, 40°01'17"N), Eff\_05 (116°35'38"E, 40°08'09"N), Eff\_06 (116°38'04"E, 39°58'00"N), Eff\_07 (116°38'13"E, 39°56'44"N, 坝河), Eff\_08 (116°38'13"E, 39°56'13"N, 小场沟河)

Fig. 6 Investigation of fecal coliforms in key drainage ports along Wenyu River

蔺沟河、清河和坝河三大支流下段的 SC 浓度分别为  $0 \sim 10 \text{ 个} \cdot \text{mL}^{-1}$ 、 $430 \sim 2460 \text{ 个} \cdot \text{mL}^{-1}$  和  $300 \sim 580 \text{ 个} \cdot \text{mL}^{-1}$ ,显然清河对温榆河病毒污染的影响最为显著。

## 4 讨论 (Discussion)

### 4.1 河流微生物污染源分析

流域微生物污染的来源主要包括城市暴雨径流、合流制系统污水溢流 (CSOs) 和生活污水溢流 (SSOs)、禽畜养殖 (AFOs)、分散式污水处理系统、污水处理厂排水及污泥等 (James *et al.*, 2004)。北京温榆河流域以城市退水、上游来水和流域分散性污水等非正规水源补给为主,其中污水处理厂排水是城市退水及微生物污染的主要来源,而清河和坝河是温榆河城市退水输送的重要渠道。温榆河流域现有污水处理厂 55 座 (张永勇等, 2009),下面对污水处理厂进行重点分析。

国外研究报道,法国 Seine 流域 12 座污水处理厂 (Servais *et al.*, 2007) 不同处理工艺对 FC 的去除效率介于  $80.0\% \sim 99.99\%$  (见表 1),其中传统活性污泥法由于停留时间短而去除效率不足  $90\%$ ;具备硝化和反硝化功能的活性污泥系统对 FC 的去除相对较好;而因水力停留时间最长,加之原生动捕

食和强烈的太阳辐射作用,塘系统对 FC 的去除率能高达 99.99%。法国和比利时 12 座污水处理厂的调查表明(George *et al.*, 2002),FC 的去除效果取决于工艺类型,初沉池的平均贡献率为 58%,二级和三级处理的作用更为显著。国内相关研究报道,混凝/沉淀/过滤对 FC 和 Cox B3 的去除率分别为 99.0%~99.9% 和 98.5%,氯消毒、臭氧消毒和超滤均可以有效去除 FC,臭氧消毒和超滤对 Cox B3 的去除率分别为 95.0%~99.9% 和 99.5%,而氯消毒对其去除效果不佳(仇付国等,2005);北京市某 3 座城市污水处理厂分别采用了传统活性污泥工艺、氧化沟工艺和 A<sup>2</sup>/O 工艺,均具有深度处理工艺(包括絮凝沉淀、加氯消毒和砂滤,其中采用 A<sup>2</sup>/O 工艺的污水处理厂没有砂滤工艺),对粪大肠菌群的总去除率为 99.99%,SC 噬菌体的去除率分别为 99.9%、99.7% 和 74.9%(李梅等,2006)。

表 1 污水处理厂不同工艺对 FC 的去除效果 (Servais, *et al.*, 2007)

污水处理厂名称	服务人口/人	工艺类型	FC 去除率
Achères	6500000	PT, D, AS	80.0%
Achères + nitrifying biofilter	—	PT, D, Bnit	98.0%
Troyes	300000	PT, D, ASnit	98.1%
Elbeuf	100000	PT, D, ASnit	98.9%
Grand-Quévilly	57000	PT, D, ASnit	99.0%
Couilly	15000	ASnit	98.5%
Guérard	2000	PT, D, ASnit	96.8%
Valenton	1200000	PT, D, ASnit + denit	99.8%
Colombes	800000	PT, D, Bc, Bnit, Bdenit	99.8%
Rouen	550000	PT, D, ASnit + denit	99.0%
Reims	470000	PT, D, ASnit + denit	99.6%
Aulnoy	90	L	99.99%

注:PT,预处理;D,初沉池;AS,活性污泥法+二层池;ASnit,具备硝化功能的活性污泥法+二沉池;Asnit+denit,具备硝化和反硝化功能的活性污泥法+二沉池;Bc,上流式除碳生物滤池;Bnit,上流式硝化生物滤池;Bdenit,上流式反硝化生物滤池;L,二级塘系统

国外文献报道,污水原水中粪大肠菌群浓度一般为  $10^7 \sim 10^9$  个  $\cdot L^{-1}$  (Servais *et al.*, 2007),而国内有文献报道,北京市某小区生活污水中 FC、SC 噬菌体分别为  $(0.1 \sim 40) \times 10^5$  个  $\cdot mL^{-1}$ 、 $0.67 \sim 43.3$  个  $\cdot mL^{-1}$  (张薛等,2006),北京市某污水处理厂进水中 FC、SC 噬菌体分别为  $1.67 \times 10^7$  个  $\cdot L^{-1}$ 、 $6.25 \times 10^3 \sim 1.34 \times 10^4$  个  $\cdot mL^{-1}$  (李梅等,2006)。本研究对清河污水处理厂排水进行了为期 1 年的跟踪

监测(但没有调查进水),结果表明,清河污水处理厂出水中 FC 和 SC 的平均浓度为  $1.35 \times 10^7$  个  $\cdot L^{-1}$  和  $1.77 \times 10^3$  个  $\cdot mL^{-1}$ ;而该污水处理厂一期和二期工程分别采用倒置 A<sup>2</sup>/O 工艺和 A<sup>2</sup>/O 工艺,均具有脱氮除磷功能,水力停留时间较长。综合上述结果,可推测清河污水处理厂的微生物去除效果不甚理想,超负荷运行以及缺乏深度处理消毒工艺可能是其主要原因。

据报道(杜静,2010),清河再生水厂二期工程建设规模为新增再生水生产能力  $47$  万  $m^3 \cdot d^{-1}$ ,其中新建污水及再生水处理系统的处理能力  $15$  万  $m^3 \cdot d^{-1}$ ,采用膜生物反应器工艺(MBR);在改造现有污水厂的基础上,新建再生水处理系统,处理能力  $32$  万  $m^3 \cdot d^{-1}$ ,采用超滤膜处理工艺。众所周知,微滤、超滤、膜生物反应器(MBR)等膜技术在污水处理中的应用日益广泛。研究表明,MBR 工艺不仅能够有效去除 COD、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、浊度等常规污染物,出水中总大肠菌群、粪大肠菌群、粪链球菌、沙门氏菌等数量均低于检出限( $300$  个  $\cdot L^{-1}$ ),而且还可以有效去除病毒, $0.22 \mu m$  和  $0.1 \mu m$  两种孔径膜对 T4 噬菌体的去除率达 99.9997% 以上,对 f2 噬菌体去除率达 99.9% (郑祥等,2005;郑祥等,2007);超滤膜孔径更小,可高效去除病原微生物,其中细菌和病毒的去除率分别高达 99.9999% 和 99.99% (石柳青等,2010)。可以预见,今后清河再生水厂的投产将会极大地降低清河的微生物污染负荷,改善清河及温榆河下游水质。

#### 4.2 河流微生物污染分析

文献报道,40% 的河流及河口难以达到水环境质量标准是源于病原微生物,其中多数以粪大肠菌群为指示微生物 (James *et al.*, 2004)。Hot 等 (Hot *et al.*, 2003) 于 1999 年 2 月—2000 年 1 月调查了法国北部加来海峡地区 4 条河流中指示微生物污染状况,FC 浓度均值为  $8.30 \times 10^4 \sim 6.35 \times 10^5$  个  $\cdot L^{-1}$ ,SC 浓度范围为  $0.4 \sim 160$  个  $\cdot mL^{-1}$ ,感染性肠道病毒检出率 3%,肠道病毒基因检出率 88%。Servais 等 (Servais *et al.*, 2007) 于 1998—2003 年调查了法国塞纳河水系中粪便指示菌的来源与归宿,总体上,塞纳河的 FC 浓度远远超出了欧盟游泳水体标准指南 ( $1000$  个  $\cdot L^{-1}$ ),巴黎市区上游和 Poses 入河口的河流水质基本符合欧盟游泳水体强制标准 ( $20000$  个  $\cdot L^{-1}$ ),塞纳河流经巴黎及郊区时大肠菌群浓度急剧上升,受 Achères 污水处理厂排水的

影响最大,FC 浓度最高达  $1 \times 10^7$  个  $\cdot L^{-1}$ ,而之后 FC 浓度逐渐下降,部分是由于相对较清洁的 Oise 河流的稀释作用.塞纳河支流 Marne 和 Oise 河流中 FC 浓度均在  $10^4 \sim 10^6$  个  $\cdot L^{-1}$  之间,微生物污染严重. Kim 等 (Kim *et al.*, 2005) 于 2001 年 10 月 ~ 2003 年 4 月调查了点源和分散污染源对韩国 Geum 河流中指示微生物的影响,不同监测站点的 FC 浓度范围为  $1.7 \times 10^3 \sim 4.45 \times 10^4$  个  $\cdot L^{-1}$ ,与流量及

农业活动密切相关.

根据《2009 年中国环境状况公报》,我国七大水系的主要污染指标为  $COD_{Mn}$ 、 $BOD_5$  和  $NH_4^+ - N$ ,其中,珠江、长江水质良好,松花江、淮河为轻度污染,黄河、辽河为中度污染,海河为重度污染.目前,我国河流水质评价中没有考虑微生物指标,然而文献调研表明我国各大水系均受到了一定程度的微生物污染(见表 2).

表 2 我国七大水系河流微生物水质状况

Table 2 Microbial water quality of the seven river systems in China

河流/水系	微生物水质	来源
珠江水系	珠江(广州段):全河段 $DO$ 、 $NH_4^+ - N$ 和 FC 超标率 100%,其中 FC 均值为 116448 个 $\cdot L^{-1}$ ,属于劣 V 类,污水处理设施滞后抵消了工业废水的治理成效  珠江广州段中山大学码头和鱼珠码头的微表层和表层水样:中山大学码头微表层和表层水样的 FC 浓度分别为 $(7.01 \pm 2.43) \times 10^6$ 和 $(2.75 \pm 0.73) \times 10^6$ 个 $\cdot L^{-1}$ ,鱼珠码头分别为 $(4.81 \pm 1.84) \times 10^6$ 和 $(2.45 \pm 0.73) \times 10^6$ 个 $\cdot L^{-1}$	(何歆等,2007)  (胡晓娟等,2010)
长江水系	宜宾市境内岷江-刮宫山、金沙江-凉姜沟和长江-石门子 3 个断面:2001 年 FC 浓度为 5400 ~ 24000 个 $\cdot L^{-1}$ ,超标率均为 100%,不同监测断面的污染程度为岷江 > 长江 > 金沙江,不同时期的污染程度分别为丰水期 > 平水期 > 枯水期  长江及支流嘉陵江(重庆段):大肠菌群超标最为普遍和频繁,长江城区段属重度污染,出境江段属中度污染;嘉陵江城区段属重度污染和严重污染	(宋在三等,2003)  (蒋良维等,1996; 杨永春等,2006)
松花江水系	松花江(吉林段):饮用水源松花江段已经受到轻度污染,属 III 类水质,主要污染物为 $COD_{Mn}$ 和 FC,2001—2003 年总大肠菌群平均值和最大值分别为 580 个 $\cdot L^{-1}$ 和 4760 个 $\cdot L^{-1}$ ,2004—2005 年粪大肠菌群平均值和最大值分别为 1025 和 4200 个 $\cdot L^{-1}$	(李英赞等,2010)
淮河水系	京杭运河(扬州段):上游水质好于下游,主要污染因子为 FC( $281 \sim 50180$ 个 $\cdot L^{-1}$ )、 $COD$ 、TP 和 $NH_4^+ - N$	(徐晓云等,2008)
黄河水系	黄河(兰州段):2001—2005 年以生物和有机污染为主,主要污染物为 FC、挥发酚、 $COD$ 、石油类、非离子氨、 $COD_{Mn}$ 和 TP,生物类和有机污染逐渐加重,丰水期最为严重  黄河(兰州段):2002—2006 年黄河(兰州段)的主要污染物为 FC 和 TN,粪大肠杆菌均值为 341828 ~ 598893 个 $\cdot L^{-1}$  黄河(兰州段):1985 年,总大肠菌群年平均值为 417400 个 $\cdot L^{-1}$ ,超标 40.7 倍;1996—2000 年,首要污染物为总大肠菌群;1998 年平均值为 571300 个 $\cdot L^{-1}$ ,2001 年为 341800 个 $\cdot L^{-1}$  黄河(白银段):1987 和 1988 年大肠菌群均值都在 1700000 个 $\cdot L^{-1}$ 以上,自 1990 年开始污染加重,大部分属于劣 V 类水质	(杜彩,2007)  (张锐坚等,2007)  (杨永春等,2006)  (杨永春等,2006)
	渭河(天水段):2002 年,全河段 FC 超标率为 22%,北道桥断面超标率为 50%	(杨永春等,2006)
	渭河及支流(西安段):渭河 FC 为 $3.4 \times 10^5 \sim 1.2 \times 10^6$ 个 $\cdot L^{-1}$ ,细菌总数为 $3.8 \times 10^4 \sim 1.8 \times 10^5$ 个 $\cdot L^{-1}$ ,支流水质差异较大,其中灞河、泾河和黑河污染相对较轻,泾河和沔河污染较重,米加岩村断面粪大肠菌群高达 $1.2 \times 10^7$ 个 $\cdot L^{-1}$ ,水质混浊、发臭	(郭爱莲等,1998)
辽河水系	辽南少水区及辽东多水区:FC 和 TB 的平均浓度分别为 358406 个 $\cdot L^{-1}$ 和 56282 个 $\cdot mL^{-1}$ ,辽河中下游河段属于“较差”和“极差”等级  浑河(抚顺段):FC 浓度为 $4.0 \times 10^4 \sim 2.6 \times 10^7$ 个 $\cdot L^{-1}$ ,各采样点和采样时期超标现象突出	(张楠等,2009)  (唐伟等,2006)
海河水系	天津市海河入出境断面:入境时 TC 和 FC 分别为 9360 和 3350 个 $\cdot L^{-1}$ ,出境时分别为 251800 和 147600 个 $\cdot L^{-1}$  津河:细菌总数中位数范围为 4700 ~ 21600 个 $\cdot mL^{-1}$ ,粪大肠菌群中位数为 12650 ~ 23000 个 $\cdot L^{-1}$ ,微生物水质介于 III 类与 V 类之间	(徐留发等,1998)  (吴丽娜等,2003)

本调查中,温榆河上游 FC 平均浓度为  $10^4 \sim 10^6$  个  $\cdot L^{-1}$ ,下游及清河下段为  $10^6 \sim 10^8$  个  $\cdot L^{-1}$ ,与

法国塞纳河 Achères 污水处理厂排水下游附近区域的水质较接近,温榆河全段没有观察到 FC 明显衰

减的现象,在国内外均处于高污染水平.此外,已有调查表明,温榆河耐药性大肠杆菌检出率较高,氨苄青霉素、四环素和磺胺的耐药率分别为 10% ~ 35%、5% ~ 25% 和 10% ~ 35% (Hu *et al.*, 2008; 施嘉琛等, 2008),可见温榆河的复合污染问题很突出.

根据温榆河的水环境功能区划(2009),温榆河上段(沙河闸-沙子营)为人体非直接接触的娱乐用水区(Ⅳ类水质),温榆河下段(沙子营-北关闸)为农业用水区及一般景观要求水域(Ⅴ类水质);清河和坝河的水环境功能区划分与温榆河相似,分别以清河桥和驼房营为上下段界线.因此,温榆河流域微生物污染的主要威胁是地下水水质以及沿岸农作物、畜牧和渔业养殖.据 2006 年北京市平原区地下水水质现状普查结果(郑凡东等, 2007),温榆河流域的海淀、昌平、朝阳都有部分区域的浅层地下水水质超过地下水Ⅳ类水质,而通州和顺义两区交界处浅层地下水大面积超过Ⅳ类水质,局部已经达到了Ⅴ类水质.地下水是北京市重要的饮用水水源,若同时遭受了微生物污染,将对饮用水安全造成重大威胁.

## 5 结论(Conclusions)

1) 温榆河上游微生物浓度波动较大,下游普遍遭受了严重的微生物污染,在国内外均处于高污染水平,病原微生物风险的可能性较大.温榆河干流微生物污染主要受到清河、坝河等排水河道及沿岸分散污水的影响,季节因素和自然衰减的作用不显著.

2) 污水处理厂排水是温榆河微生物污染的主要来源,超负荷运行和消毒等深度处理工艺的缺乏导致了污水处理厂对微生物的去除效果低下.温榆河微生物污染有可能威胁地下水水质和灌溉农作物.

今后温榆河微生物污染的风险控制应着重在以下方面:1) 加大沿岸分散污水的截污与处理力度,大力建设和升级改造污水处理设施,提高污水处理率和排放达标率,大幅削减入河污染负荷,改善河流水质;2) 从支流入手,加快河流生态治理与修复,逐步恢复河流生态系统与功能,维护河流生态健康;3) 加强河流和地下水的微生物污染监测,建立病原微生物风险预警体系,严格饮用水和农产品的质量监管.

**责任作者简介:** 郑祥,副教授(博士),硕士生导师.2008 年入选北京科技新星,2010 年入选中国人民大学明德青年学者.郑祥博士长期致力于膜技术在水处理系统的应用以及水环境系统中病原微生物污染控制的研究.已在新型膜生物反应器(MBR)研制、病原微生物在水环境系统中的行为归趋及其削减途径等领域的研究中取得了创新性成果.主持“国家自然科学基金”、“霍英东教育基金”等多项国家及省部级课题.从 2008 年至今,主持编写了 5 部行业分析报告;2008、2009 以及 2010 年度《中国膜产业发展报告》,2008、2009 年度《膜生物反应器行业分析报告》,受到产业界与金融界的高度评价.已在国内外学术期刊上发表论文 40 余篇,其中 SCI 收录 9 篇, EI 收录 12 篇, ISTP 收入 6 篇.论文已被同行引用近 800 次,其中 6 篇中文论文的单篇引用率超过 80 次.

## 参考文献(References):

- 北京市环境保护局. 2009. 北运河水系[OL]. 北京:北京市环境保护局. 2009-11-01. <http://www.bjepb.gov.cn/portal0/tab189/info7016.htm>
- Beijing Municipal Environmental Protection Bureau. 2009. Beiyun River System [OL]. Beijing: Beijing Municipal Environmental Protection Bureau. 2009-11-01. <http://www.bjepb.gov.cn/portal0/tab189/info7016.htm> (in Chinese)
- 杜彩. 2007. 黄河兰州段地表水体污染现状与防治对策[J]. 甘肃科技, 23(6): 14-15, 24
- Du C. 2007. Surface water pollution and prevention countermeasures in the Yellow River (Lanzhou section) [J]. Gansu Science and Technology, 23(6): 14-15, 24 (in Chinese)
- 杜静. 2010. 潘安君检查清河再生水厂二期工程[OL]. 北京:北京水务网站. 2010-01-12. <http://www.bjwater.gov.cn/tabid/134/InfoID/15403/frtid/74/Default.aspx>.
- Du J. 2010. Pan Anjun Checked the second-term project of Renewable Water in Qing He WWTP [OL]. Beijing: Beijing Water website, 2010-01-12, <http://www.bjwater.gov.cn/tabid/134/InfoID/15403/frtid/74/Default.aspx>. (in Chinese)
- 方肇寅, 宋燕燕, 董虹, 等. 1992. 北京饮用水源病毒污染研究[J]. 病毒学报, 8(3): 240-244
- Fang Z Y, Song Y Y, Dong H, *et al.* 1992. A study of viruses contamination in drinking water supplies in Beijing [J]. Chinese Journal of Virology, 8(3): 240-244 (in Chinese)
- George I, Crop P, Servais P. 2002. Fecal coliform removal in wastewater treatment plants studied by plate counts and enzymatic methods [J]. Water Research, 36(10): 2607-2617
- 郭爱莲, 宁东俊, 韩芳桥, 等. 1998. 西安地区河流水质的卫生细菌学调查和建议[J]. 西北大学学报:自然科学版, 28(1): 60-63
- Guo A L, Ning D J, Han F Q, *et al.* 1998. A bacterium investigation about the water quality in the rivers' Xi'an area and some suggestions [J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 28(1): 60-63 (in Chinese)
- 国家环境保护总局. 2007. HJ/T 347—2007: 水质 粪大肠菌群的测定 多管发酵法和滤膜法(试行)[S]. 北京: 中国环境科学出版社



出版社

- State Environmental Protection Administration. 2007. HJ/T 347—2007: Water Quality-Test of Fecal Coliform-Multiple-tube Fermentation Technique and Filter Membrane Method [S]. Beijing: China Environmental Science Press (in Chinese)
- 何歆, 冯佳和, 李松青, 等. 2007. 珠江(广州河段)前航道水域生态环境评价[J]. 水利渔业, 27(1): 74-75
- He X, Feng J H, Li S Q, *et al.* 2007. Aquatic eco-environment assessment of the former channel of Pearl River (Guangzhou setion) [J]. Water Conservancy Fishery, 27(1): 74-75 (in Chinese)
- Hot D, Legeay O, Jacques J, *et al.* 2003. Detection of somatic phages, infectious enteroviruses and enterovirus genomes as indicators of Human enteric viral pollution in surface water[J]. Water Research, 37(19): 4703-4710
- Hu J, Shi J, Chang H, *et al.* 2008. Phenotyping and genotyping of antibiotic-resistant escherichia coli isolated from a natural river basin [J]. Environ Sci Technol, 42(9): 3415-3420
- 胡晓娟, 张俊, 杨宇峰. 2010. 珠江广州河段水质及微生物周年变化特征[J]. 安全与环境学报, 10(3): 89-93
- Hu X J, Zhang J, Yang Y F. 2010. Study on the annual changes in water quality and microorganism in the Guangzhou sect of the Pearl River[J]. Journal of Safety and Environment, 10(3): 89-93 (in Chinese)
- ISO TC 147/SC 4/WG 11. 1995. ISO 10705- 1 Detection and Enumeration of Bacteriophages Part 1: Enumeration of F-Specific Rna Bacteriophages[S]. Switzerland; Case Postale
- ISO TC 147/SC 4/WG 11. 2000. ISO 10705- 2 Detection and Enumeration of Bacteriophages Part 2: Enumeration of Somatic Coliphages[S]. Switzerland; Case postale
- James E S, Joyce M P. 2004. Assessment and management of watershed microbial contaminants [J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 34(2): 109-139
- 蒋良维, 张大元. 1996. 重庆市环境质量状况与预测[J]. 重庆环境科学, 18(6): 33-37
- Jiang L W, Zhang D Y. 1996. Present situation and forecasting of environmental quality in Chongqing[J]. Environmental Science of Chongqing, 18(6): 33-37 (in Chinese)
- Kim G, Choi E, Lee D. 2005. Diffuse and point pollution impacts on the pathogen indicator organism level in the Geum River, Korea[J]. Science of the Total Environment, 350(1): 94-105
- 孔繁翔. 2000. 环境生物学[M]. 北京: 高等教育出版社
- Kong F X. 2000. Environmental Biology [M]. Beijing: Higher Education Press (in Chinese)
- 李梅, 胡洪营, 张薛, 等. 2006. 城市污水处理工艺对噬菌体的去除效果[J]. 环境科学, 27(1): 80-84
- Li M, Hu H Y, Zhang X, *et al.* 2006. Removal of coliphages by wastewater treatment processes [J]. Environmental Science, 27(1): 80-84 (in Chinese)
- 李英赞, 刘骥艳, 展鹏. 2010. 吉林市饮用水水源松花江段污染现状和对策[J]. 吉林化工学院学报, (2): 21-23
- Li Y Z, Liu J Y, Zhan P. 2010. Present situation and countermeasures of the contaminated drinking water source within the section of Songhua River in Jilin City[J]. Journal of Jilin Institute of Chemical Technology, (2): 21-23 (in Chinese)
- 刘芳, 吴晓磊. 2007. 指示水体病原污染的微生物及其检测[J]. 环境工程学报, 1(2): 139-144
- Liu F, Wu X L. 2007. Microorganisms indicating pathogen contamination in waters and their detection[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 1(2): 139-144 (in Chinese)
- 刘永军, 张崇森, 王晓昌, 等. 2007. 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, 20(2): 89-93
- Liu Y J, Zhang C M, Wang X C, *et al.* 2007. Application of pathogenic bacteria detection in surface water by Universal primer PCR method [J]. Research of Environmental Science, 20(2): 89-93 (in Chinese)
- 吕怡兵, 宫正宇, 连军, 等. 2007. 长江三峡库区蓄水后水质状况分析[J]. 环境科学研究, 20(1): 1-6
- Lü Y B, Gong Z Y, Lian J, *et al.* 2007. Status of water quality in the Three Gorges after the water storage period [J]. Research of Environmental Sciences, 20(1): 1-6 (in Chinese)
- 仇付国, 王晓昌. 2005. 污水再生工艺去除病原体效果的评价[J]. 中国给水排水, 21(7): 52-54
- Qiu F G, Wang X C. 2005. Assessment on wastewater reclamation and reuse process for pathogen removal[J]. China Water & Wastewater, 21(7): 52-54 (in Chinese)
- Servais P, Garcia-Armisen T, George I, *et al.* 2007. Fecal bacteria in the rivers of the seine drainage network (france): sources, fate and modelling[J]. Science of the Total Environment, 375(1/3): 152-167
- 施嘉琛, 胡建英, 常红, 等. 2008. 北京温榆河流域耐药大肠杆菌的调查[J]. 中国环境科学, 28(1): 39-42
- Shi J C, Hu J Y, Chang H, *et al.* 2008. Investigation on the antibiotic-resistance E. coli in Wenyu river in Beijing [J]. China Environmental Science, 28(1): 39-42 (in Chinese)
- 石柳青, 贾风莲, 黎泽华, 等. 2010. 超滤在清河污水处理再生水厂的应用[J]. 水工业市场, (6): 53-55
- Shi L Q, Jia F L, Li Z H, *et al.* 2010. Application of ultrafiltration in Qinghe regeneration waterworks[J]. Water Industry Market, (6): 53-55 (in Chinese)
- 宋燕燕, 王秀云, 索玉琴, 等. 1991. 北京地区水中病毒的检测和去除的研究[J]. 北京医学, 13(4): 215-217
- Song Y Y, Wang X X, Suo Y Q, *et al.* 1991. Research of virus detection and removal in surface water in Beijing [J]. Medicine Science of Beijing, 13(4): 215-217 (in Chinese)
- 宋在兰, 张兰, 黄斌. 2003. 宜宾市三江水体粪大肠菌群污染现状调查[J]. 四川环境, 22(6): 36-38
- Song Z L, Zhang L, Huang B. 2003. Investigation on pollution of fecal coliform at the Three-river Joint[J]. Sichuan Environment, 22(6): 36-38 (in Chinese)
- 唐伟, 于波, 张国平, 等. 2006. 浑河(抚顺段)水质粪大肠菌群污染现状研究[J]. 环境科学与管理, 31(7): 76-78
- Tang W, Yu B, Zhang G P, *et al.* 2006. Investigation on pollution of fecal coliform at the Fushun section of Hunhe river [J]. Environmental Science and Management, 31(7): 76-78 (in Chinese)

- Chinese)
- 王劭勇, 黄立山. 2006. 吸纳社会资金建设温榆河绿色生态走廊 [J]. 北京水务, (4): 25-26
- Wang J Y, Huang L S. 2006. Absorbing social capital and constructing green ecological corridor in Wenyu River [J]. Beijing Water, (4): 25-26 (in Chinese)
- 温东辉, 李璐. 2007. 以有机污染为主的河流治理技术研究进展 [J]. 生态环境, 16(5): 1539-1545
- Wen D H, Li L. 2007. Development of the treatment technologies for organic polluted rivers [J]. Ecology and Environment, 16(5): 1539-1545 (in Chinese)
- 吴丽娜, 吕严, 赵光宇, 等. 2003. 天津市津河有机物和生物性污染调查研究 [J]. 环境与健康杂志, 20(5): 292-293
- Wu L N, Lv Y, Zhao G Y, et al. 2003. An elementary study on organic and biological contamination in Jin River water of Tianjin [J]. Journal of Environment and Health, 20(5): 292-293 (in Chinese)
- 徐留发, 崔春明. 1998. 海河水中大肠菌群与粪大肠菌群的分布及相关性初步研究 [J]. 环境与健康杂志, 15(4): 192-192
- Xu L F, Cui C M. 1998. Distribution and preliminary correlation analysis of total coliform and fecal coliform in Hai River [J]. Journal of Environment and Health, 15(4): 192-192 (in Chinese)
- 徐晓云, 陈效民, 谢继征. 2008. 模糊综合评价法用于京杭运河扬州段的水质评价 [J]. 中国给水排水, 24(24): 107-110
- Xu X Y, Chen X M, Xie J Z. 2008. Evaluation on water quality of Jinghang Canal in Yangzhou by fuzzy comprehensive assessment method [J]. China Water and Wastewater, 24(24): 107-110 (in Chinese)
- 杨永春, 刘治国. 2006. 近30年来中国西部河谷型城市水体污染变化趋势与机制 [J]. 山地学报, 24(1): 33-53
- Yang Y C, Liu Z G. 2006. The changing trend and mechanism of water pollution of valley-city in the west of China during recent 30 years [J]. Journal of Mountain Science, 24(1): 33-53 (in Chinese)
- 张楚瑜, 李小锋, 王祖卿, 等. 1991. 武汉东湖水体中病毒和指示细菌的研究 [J]. 武汉大学学报(自然科学版), (1): 99-108
- Zhang C Y, Li X F, Wang Z Q, et al. 1991. Research of viruses and indicator bacteria in Dong Lake, Wuhan [J]. Journal of Wuhan University (Natural Science Edition), (1): 99-108 (in Chinese)
- 张甲耀, 陈厚华, 杨国栋, 等. 1992. 武汉市墨水湖地区复合氧化塘对大肠菌群的去除效果及影响因素 [J]. 环境工程, (6): 12-15
- Zhang J Y, Chen H H, Yang G D, et al. 1992. Removal and influence factors of coliforms in composite oxidation pond in Moshui Lake, Wuhan [J]. Environmental Engineering, (6): 12-15 (in Chinese)
- 张楠, 孟伟, 张远, 等. 2009. 辽河流域河流生态系统健康的多指标评价方法 [J]. 环境科学研究, 22(2): 162-170
- Zhang N, Meng W, Zhang Y, et al. 2009. Multi-variable assessment of river ecosystem health in Liao River basin [J]. Research of Environmental Science, 22(2): 162-170 (in Chinese)
- 张锐坚, 张国珍, 武福平. 2007. 黄河兰州段水质污染分析及防治对策 [J]. 环境科学与管理, 32(12): 27-30
- Zhang R J, Zhang G Z, Wu F P. 2007. Assessment and countermeasure on the water pollution of Lanzhou reach of Yellow River [J]. Environmental Science and Management, 32(12): 27-30 (in Chinese)
- 张薛, 胡洪营, 李梅. 2006. 再生水中病原指示微生物的浓度水平研究 [J]. 中国给水排水, 22(9): 26-29
- Zhang X, Hu H Y, Li M. 2006. Research on concentration levels of pathogenic microorganism indicators in different domestic sewage and reclaimed water [J]. China Water & Wastewater, 22(9): 26-29 (in Chinese)
- 张永勇, 陈军锋, 夏军, 等. 2009. 温榆河流域闸坝群对河流水量水质影响分析 [J]. 自然资源学报, 24(10): 1697-1705
- Zhang Y Y, Chen J F, Xia J. 2009. Research on the impact of dams and floodgates on riverine runoff and water quality in Wenyu River Basin [J]. Journal of Natural Resources, 24(10): 1697-1705 (in Chinese)
- 赵淑敏, 田勇琴, 邵岩, 等. 1998. 天津市不同水体病毒污染情况的调查 [J]. 环境与健康杂志, 15(2): 75-77
- Zhao S M, Tian Y Q, Shao Y, et al. 1998. A survey of virus pollution in different water bodies in Tianjin [J]. Journal of Environment and Health, 15(2): 75-77 (in Chinese)
- 郑凡东, 孟庆义, 王培京, 等. 2007. 北京市温榆河水环境现状及治理对策研究 [J]. 北京水务, (5): 5-8
- Zheng F D, Meng Q Y, Wang P J, et al. 2007. Study on status and improvement strategies of water environment in Wenyu River of Beijing [J]. Beijing Water, (5): 5-8 (in Chinese)
- 郑祥, 刘俊新. 2007. MBR对污水中肠道模型病毒的去除效应 [J]. 中国科学(B辑:化学), 37(4): 390-396
- Zheng X, Liu J X. 2007. Removal of enteric model virus in sewage by MBR [J]. Science in China (Series B: Chemistry), 37(4): 390-396 (in Chinese)
- 郑祥, 吕文洲, 杨敏, 等. 2005. 膜生物反应器去除污水中病毒的试验研究 [J]. 科学通报, 50(2): 117-122
- Zheng X, Lü W Z, Yang M, et al. 2005. Removal of virus in sewage by membrane bioreactor [J]. Chinese Science Bulletin, 50(2): 117-122 (in Chinese)