

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第1期

Vol.39 No.1

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2006~2015年北京市不同地区 O ₃ 浓度变化	王占山, 李云婷, 安欣欣, 李倩, 孙乃迪, 王步英, 潘锦秀	(1)
南京北郊黑碳气溶胶的来源解析	肖思略, 于兴娜, 朱彬, 何稼祺, 吕睿, 沙丹丹	(9)
电镀厂周边大气 PM ₁₀ 中重金属季节性分布特征及生态风险评价	赵珍丽, 赵委托, 黄庭, 程胜高, 余葱葱, 尹伊梦	(18)
广西玉林市大气 PM ₁₀ 和 PM _{2.5} 中有机碳和元素碳污染特征分析	黄炯丽, 陈志明, 莫招育, 李宏姣, 杨俊超, 刘慧琳, 毛敬英, 梁桂云, 张达标, 吴熊平, 郝爽	(27)
青岛近海及黄渤海大气气溶胶中不同形态氮磷质量浓度及组成特征	张瑞峰, 祁建华, 丁雪, 谢丹丹	(38)
大气环境分区管理: 以广东省为例	杨柳林, 李敏辉, 廖程浩, 曾武涛, 张晖, 张永波	(49)
基于高分影像的城市黑臭水体遥感识别: 以南京为例	温爽, 王桥, 李云梅, 朱利, 吕恒, 雷少华, 丁萧蕾, 苗松	(57)
基于 SWAT 模型的流域河道硝酸盐 δ ¹⁵ N 和 δ ¹⁸ O 模拟	王康, 冉宁, 林忠兵, 周祖昊	(68)
程海流域非点源污染负荷估算及其控制对策	陈学凯, 刘晓波, 彭文启, 董飞, 黄智华, 冯顺新, 王若男	(77)
陆浑水库饮用水源地水体中金属元素分布特征及健康风险评价	余葱葱, 赵委托, 高小峰, 程胜高, 谢地, 马鹏途	(89)
天津供水系统中抗生素分布变化特征与健康风险评价	张新波, 宋姿, 张丹, 刘楠楠, 李楠, 温海涛	(99)
西南丘陵区村镇典型供水水源有机物分布特征及对饮水水质的影响	王琼, 李乃稳, 李磊, 李龙国, 苟思, 杨凌肖	(109)
北京市地下水有机氯和有机磷农药健康风险评价	陈卫平, 彭程伟, 杨阳, 吴玉梅	(117)
黄河岸边土壤中类二噁英类多氯联苯污染现状及风险	姚宏, 卢双, 张旭, 裴晋, 鲁垠涛	(123)
淹水落干下三峡水库消落带土壤无机磷形态转化特征	周健, 李春辉, 张志永, 胡红青, 万成炎, 胡莲, 潘晓洁	(130)
磷酸盐对铁锰复合氧化膜去除地表水中氨氮的影响	卓瑞双, 黄廷林, 张瑞峰, 文刚	(137)
K ₂ S ₂ O ₈ 强化 g-C ₃ N ₄ 薄膜电极光电催化降解 Cu(CN) ₂ ⁻ 并同步回收 Cu	党聪哲, 李一兵, 王彦斌, 赵旭	(145)
以 HKUST-1 为模板制备铜氧化物活化过一硫酸氢钾降解罗丹明 B	蒲嘉懿, 万金泉, 王艳, 马邕文, 武书彬	(152)
氨化松香基交联聚合树脂对水中诺氟沙星的吸附性能	马亚红, 黄婉婷, 刁开盛, 李鹏飞, 谭学才, 董慧岭, 覃方夸, 雷福厚, 刘绍刚	(161)
铁锰泥除砷颗粒吸附剂对 As(V) 的吸附去除	曾辉平, 吕赛赛, 杨航, 尹灿, 曹瑞华, 王艳菊, 李冬, 张杰	(170)
水铁矿及其胶体对砷的吸附与吸附形态	马玉玲, 马杰, 陈雅丽, 雷梅, 郭华明, 翁莉萍, 李永涛	(179)
阳(阴)离子复配修饰两性磁性膨润土的表面特征差异及对苯酚吸附的影响	任爽, 孟昭福, 王腾, 张洋, 田凯, 刘伟, 闫东旭	(187)
典型城市污水中对羟基苯甲酸酯的污染特征	赵雪, 张子峰, 祝富杰, 李一凡, 马万里	(195)
水力停留时间对活性炭生物转盘处理污水的影响	许雯佳, 成小英	(202)
环丙沙星对膜生物反应器运行效能的影响及其去除特性	戴琦, 刘锐, 舒小铭, 张永明, 陈吕军	(212)
AAO 工艺低氧条件下的运行及其模拟	曹特特, 王林, 李咏梅	(219)
磷酸盐对亚硝化系统的抑制及恢复	顾澄伟, 陈方敏, 李祥, 张程锦	(227)
碳源对污水处理厂 SAD 工艺小试的影响	李冬, 赵世勋, 王俊安, 朱金凤, 关宏伟, 张杰	(232)
容积负荷对 ABR-MBR 工艺反硝化除磷性能的影响	吕亮, 尤雯, 韦佳敏, 吴鹏, 沈耀良	(239)
DNBF-O ₃ -GAC 组合工艺深度脱除氮磷及代谢产物	钟丽燕, 郝瑞霞, 王卫东, 万京京, 朱晓霞	(247)
交替好氧/缺氧运行模式对生物脱氮效能及活性污泥胞外聚合物的影响	孙洪伟, 陈翠忠, 吴长峰, 赵华南, 于雪, 方晓航	(256)
纳米零价铁对升流式颗粒污泥床反硝化性能的影响	周丰, 王翻翻, 钱飞跃, 黄慧敏, 沈耀良, 周建民	(263)
高含固污泥厌氧消化中 Fe/S 及 pH 对原位抑硫效率影响及其交互作用	韩芸, 曹玉芹, 卓杨, 王晓飞, 韩雅婷, 彭党聪	(269)
浑河流域贮存污泥成分特征及演变规律分析	刘甜甜, 崔崇威, 赫俊国, 唐建	(276)
去除城市生活污泥中有机络合态金属强化其厌氧生物制气	卢怡清, 许颖, 董滨, 戴晓虎	(284)
污泥飞灰中重金属不同浸出方法比较及综合毒性评价	王丰, 李润东, 李彦龙, 赵云斌, 杨天华	(292)
初冬时期闽江河口区养殖塘排水后的 CH ₄ 和 N ₂ O 通量日变化特征	杨平, 谭立山, 黄佳芳, 何清华, 全川	(300)
3 种土壤改良剂对河套灌区玉米田温室气体排放的影响	武岩, 红梅, 林立龙, 刘梅, 刘宇杰	(310)
有机氮替代比例对冬小麦/夏玉米轮作体系作物产量及 N ₂ O 排放的影响	侯苗苗, 吕凤莲, 张弘毅, 周应田, 路国艳, Ayaz Muhammad, 黎青慧, 杨学云, 张树兰	(321)
拔节期水稻光合碳输入的动态变化及其对施氮的响应: ¹³ C-CO ₂ 脉冲标记	陈珊, 祝贞科, 袁红朝, 王久荣, 彭佩钦, 葛体达, 吴金水	(331)
陕北黄土丘陵区不同土地利用方式下土壤碳剖面分布特征	兰志龙, 赵英, 张建国, 李会杰, 司炳成, 焦瑞, Muhammad Numan Khan, Tanveer Ali Sial	(339)
不同地表条件下生物炭对土壤氮挥发的影响	邹娟, 胡学玉, 张阳阳, 陈窃君, 王向前, 刘扬	(348)
秸秆与生物炭还田对土壤团聚体及固碳特征的影响	徐国鑫, 王子芳, 高明, 田冬, 黄容, 刘江, 黎嘉成	(355)
县域尺度土壤铜的有效性及相关影响因素评估	李锦芬, 瞿明凯, 刘刚, 黄标	(363)
基于改进 LUR 模型的区域土壤重金属空间分布预测	曾菁菁, 沈春竹, 周生路, 陆春峰, 金志丰, 朱雁	(371)
沈北新区土壤中多环芳烃污染特征及源解析	李嘉康, 宋雪英, 魏建兵, 王颖怡, 李玉双, 郑学昊	(379)
磷酸盐、腐殖酸与粉煤灰联合钝化处理模拟铅镉污染土壤	赵庆圆, 李小明, 杨麒, 陈灿, 钟振宇, 钟宇, 陈飞, 陈寻峰, 王祥	(389)
控源及改良措施对稻田土壤和水稻镉累积的影响	封文利, 郭朝晖, 史磊, 肖细元, 韩晓晴, 冉洪珍, 薛清华	(399)
典型土壤双季稻对 Cd 吸收累积差异	李欣阳, 龙坚, 王树兵, 陈齐, 董霞, 蒋凯, 侯红波, 彭佩钦, 廖柏寒	(406)
松花江上游夹皮沟金矿开采区芦苇叶片汞分布特征	张曼胤, 李梦洁, 崔丽娟, 王贺年, 郭子良, 徐卫刚, 魏圆云, 杨思, 肖红叶	(415)
硝酸盐对土壤反硝化活性及厌氧降解的影响	代军帅, 左小虎, 王明霞, 姚炎红, 周志峰	(422)
长期施肥对稻田土壤微生物量、群落结构和活性的影响	王伟华, 刘毅, 唐海明, 孙志龙, 李宝珍, 葛体达, 吴金水	(430)
海洋沉积物中硫酸盐还原菌和硫酸化菌群落分析方法的比较	张玉, 米铁柱, 甄毓, 陈烨, 付璐璐, 王勋功	(438)
鄱阳湖微囊藻毒素时空分布格局及其与理化及生物因子的关系	袁丽娟, 廖旦根, 张莉, 张大文, 罗林广, 刘聚涛	(450)
畜禽粪便中多重耐药细菌及耐药基因分布特征	张昊, 王盼亮, 杨清香, 俞宁	(460)
烟气净化工艺和焚烧炉类型对生活垃圾焚烧灰灰性质的影响	章骅, 于思源, 邵立明, 何品晶	(467)

西南丘陵区村镇典型供水水源有机物分布特征及对饮用水水质的影响

王琼¹, 李乃稳^{1,2}, 李磊³, 李龙国^{1,2}, 苟思^{1,2*}, 杨凌肖¹

(1. 四川大学水利水电学院, 成都 610065; 2. 四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 成都 610065; 3. 四川蜀禹水利水电工程设计有限公司, 成都 610065)

摘要: 以西南丘陵区村镇典型供水水源原水及其净化水为研究对象, 分析了水质净化常规工艺前后其有机污染物分布特征及对饮用水水质的影响。结果表明: 该区域村镇供水水源属微污染水源水体, 有机污染物以溶解性中小分子有机物为主, 占有机物总量的 50% ~ 80%。共检测到 53 种共 14 类有机物, 主要为烷烃、酯、酚、苯类物质, 占有机物总量的 80% ~ 90% 左右, 有机酸、烯烃、醇和醛含量较小。有机物中二氯甲烷、苯酚、邻苯二甲酸二丁酯含量较高, 并且出现了除草剂、食品添加剂、抗生素等污染物, 如特丁津、2,6-二叔丁基对甲酚、萘啶酸等。水质净化常规工艺主要去除相对分子质量 $> 10 \times 10^3$ 的有机物, 小分子量有机物中有机酸类去除效果较好, 但烷烃、酯、酚、苯类有机物去除效果较差。

关键词: 供水水源; 有机物; 分布特征; 水质净化常规工艺; 水质; 西南丘陵区

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)01-0109-08 DOI: 10.13227/j.hjks.201705246

Organic Distribution Characteristics and Influence on Drinking Water Quality in the Typical Water Sources for Towns in the Southwest Hilly Area of China

WANG Qiong¹, LI Nai-wen^{1,2}, LI Lei³, LI Long-guo^{1,2}, GOU Si^{1,2*}, YANG Ling-xiao¹

(1. College of Water Resource & Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 3. Sichuan Shuyu Water Conservancy and Hydropower Engineering Design Co., Ltd., Chengdu 610065, China)

Abstract: This study analyzed the organic distribution characteristics of original and treated water and their impacts on drinking water quality using a conventional water treatment process in the typical water supply sources for towns in the southwest hilly area of China. The results showed that the water supply source in this area is micro-polluted water. Dissolved organics of low molecular weight accounted for the great majority of the organics, with the proportion ranging from 50% to 80%. There were 53 kinds and 14 classes of organics, including alkanes, esters, phenolic compounds, and benzenes, with the proportion from 80% to 90%. The amounts of organic acid, alkene, alcohols, and aldehyde were small, while the amounts of dichloromethane, phenol, and dibutyl-phthalate were relatively high. Herbicides, food additives, and antibiotics were detected, such as terbutylazine, 2,6-di-tert-butyl-*p*-cresol, and nalidixic acid. The conventional water treatment process could efficiently remove the compounds with molecular weights higher than 10×10^3 and organic acid; however, it was limited greatly in its removal of alkanes, esters, phenolic compounds, and benzenes.

Key words: drinking source; organics; distribution characteristics; conventional water treatment process; water quality; southwest hilly area

目前,城镇饮水安全已成为我国全社会关注的热点之一。自“十一五”规划实施农村饮水安全工程建设以来,到“十二五”末,我国农村饮水安全问题已基本解决^[1],农民健康水平得到了提高,农村生产生活条件得到了改善。我国村镇供水分为集中式供水和分散式供水,水厂大多以临近江河、中小型水库、山溪水为水源。四川丘陵区因其水库具有水量稳定的特点,多为城镇饮用水源和应急备用水源。而这些中小型水库则由于农业面源污染的影响,由此造成富营养化问题,水中污染物种类多、量超标、低浓度难去除,长期以来饮水不安全问题十分突出^[2]。水厂现行的常规处理工艺即絮凝 + 沉淀 + 过

滤 + 消毒虽然对总磷去除效果明显,去除率可达 60% ~ 90%^[3,4],但对有机物的去除效果却不理想^[3,5~8],而有机物与消毒副产物的生成有重要关联^[9~11]。对水质安全性的检测、评价与分析,判断水源水质指标是否符合《生活饮用水卫生标准》^[12]的相关规定,是目前急需解决的问题。而我国村镇人口规模较小,一般为 2 000 ~ 30 000 人,水利公共基

收稿日期: 2017-05-24; 修订日期: 2017-07-06

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0206006); 四川省科技支撑计划项目(2016FZ0111)

作者简介: 王琼(1992~),女,硕士研究生,主要研究方向为饮用水处理, E-mail: 769658688@qq.com

* 通信作者, E-mail: 359786010@qq.com

础服务设施主要集中在城市,对村镇供水水源水质安全关注度不够^[13],本文针对我国西南丘陵区村镇供水的典型水源进行了详细的分析以探究其水质特征,并对上述水源经常规净水工艺处理后的出水水质也进行了相应地分析,以期为提高该区域村镇居民饮水安全提供依据。

1 材料与方法

1.1 取水水源

本实验选取四川省遂宁市内中小型水库:狮子湾水库、麻子滩水库、跑马滩水库、白安河及板凳垭村河塘为饮水水源水质分析取样点。其中狮子湾水库为小(二)型水库,正常水位库容为 57.6 万 m^3 ,地处浅丘区域,周边为农田;麻子滩水库为中型水库,正常水位库容为 5 729 万 m^3 ,地处浅丘和深丘区域,周边多为农田和林地;跑马滩水库为中型水库,正常水位库容 1 360 万 m^3 ;白安河干流长 80 km,流域面积 456.4 km^2 ,上游建有中型水库 3 座,小型水库 24 座;板凳垭村河塘容积为 8 万 m^3 。所选取水点地形为浅丘或深丘地域,水源周边多为农田,其中跑马滩水库横跨乐至和安居两县市,城镇供水厂规模大小不一,规模从 600 ~ 30 000 $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 不等,是该区域县城或村镇的供水水源,具有典型的西南丘陵区村镇供水水源的特点。因此选取上述水源点对其水源水及净化出厂水进行水质分析研究,对于了解西南丘陵区村镇供水水源水质状况和饮水安全具有重要意义。

在实验室内以聚合氯化铝(PAC)为絮凝剂,进行混凝、沉淀和过滤处理后(由于本实验的立足点在于消毒之前能去除更多的有机物,以期减少消毒副产物的产生,所以不进行消毒实验),对原水及处理水进行水质常规指标和有机物指标分析。

1.2 常规指标检测

常规检测项目包括 pH、浊度、总有机碳(TOC)、总磷(TP)、氨氮($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)、硝酸盐氮($\text{NO}_3^- - \text{N}$)、亚硝酸盐氮($\text{NO}_2^- - \text{N}$)。检测方法按照《生活饮用水标准检验方法》(GB/T 5750-2006)进行。同时还测量了水中有机物在 254 nm 波长紫外光下的吸光度(UV_{254})和溶解氧(DO)两个指标, UV_{254} 采用紫外分光光度计(UV765,上海佑科仪器仪表有限公司提供)测量,用以表征水中天然存在的腐殖质类大分子有机物以及含 C=C 双键和 C=O 双键芳香族化合物的含量。DO 采用便携式 DO 溶解氧测定仪(JPBJ-608,上海仪电科学仪器股

份有限公司)测定。

1.3 有机物检测

1.3.1 有机物分子量分布检测

采用超滤膜法检测原水和处理水的有机物分子量分布。首先水样经 0.45 μm 微滤膜真空抽滤以去除水中非溶解性物质,然后依次通过截留相对分子质量为 100×10^3 、 50×10^3 、 30×10^3 、 10×10^3 、 5×10^3 、 3×10^3 、 1×10^3 、 0.5×10^3 的超滤膜,分别测定其 TOC 值,从而确定有机物分子量分布。超滤仪器为氮气加压搅拌型超滤杯(型号:SMC-300,上海摩速科学器材有限公司提供),有效容积 300 mL,最大耐压为 0.22 kPa;超滤膜为美国 sepro 系列的 PS 超滤膜;TOC 测定采用日本岛津公司总有机碳分析仪(型号:TOC-VE)。

1.3.2 有机物基团及结构检测

原水及处理水经浓缩蒸干后,与干燥的 KCl(光谱纯)磨细混匀,以 10 t 的压力压制 1 min,制成空白 KCl 压片,采用 Nicolet 6700 傅里叶变换红外光谱仪(美国 Thermo Fisher 生产)测定得出其红外光谱图,分析水中有有机物基团、结构。

1.3.3 有机物定性定量检测

有机物定性定量检测采用日本岛津 GCMS-QP2010 Plus 气质联用仪,定量方法采用内标法,内标物为乙酸乙酯。水样经固相微萃取前处理之后进行测定。气相色谱条件:柱箱温度 40℃;进样温度 250℃;载气:99.99% 氦气;分流进样,分流比为 2.0;柱流量(恒流模式):1.0 $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$;升温程序:40℃ 保持 8 min,以 10 $^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 的速率升温至 280℃ 保持 5 min;总流量为 6.0 $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$,平衡时间 0.5 min。质谱条件:电子轰击(EI)离子源;离子源温度 5 $^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 的速率升温至 80℃ 保持 2 min,以 200℃,接口温度 220℃,溶剂延迟时间 0.20 min,扫描速度 1 000 $\text{u} \cdot \text{s}^{-1}$,质量范围 33.00 ~ 1 090 m/z 。

2 结果与讨论

2.1 常规指标

各取水样点原水水质及处理水水质情况表 1。

由表 1 可知,各水源水的 pH 值在 7 ~ 8 之间,属于中性偏弱碱性水。浊度指标不同,浊度最高的是板凳垭村河塘,达到了 93.487 NUT,浊度最低的是跑马滩水库,为 28.370 NUT。各水源水总磷含量较高,在 0.348 ~ 0.656 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,最高的是麻子滩水库,为 0.656 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,最低的是白安河,为 0.348

表 1 原水及出厂水水质指标¹⁾

Table 1 Water quality indexes of raw and treated water

水源点	pH A	浊度 A/B/C	TP A/B/C	NH ₄ ⁺ -N A/B/C	NO ₂ ⁻ -N A/B/C	NO ₃ ⁻ -N A/B/C	TOC A/B/C	UV ₂₅₄ A/B/C	DO A
狮子湾水库	7.38	46.24/2.100/95.46	0.6260/0.3070/50.98	0.860/0.790/7.98	0.0207/0.0223/-7.36	0.109/0.105/3.67	6.88/5.18/24.71	0.033/0.017/48.48	7.01
麻子滩水库	7.76	29.99/1.010/96.63	0.6560/0.3140/52.13	0.151/0.140/6.69	0.0033/0.0029/12.12	0.0180/0.0160/11.11	4.11/2.96/27.98	0.069/0.057/17.39	6.60
跑马滩水库	7.71	28.37/1.015/96.42	0.5610/0.2640/52.84	0.153/0.144/5.98	0.0147/0.0164/-11.56	0.0190/0.0130/31.58	6.22/4.01/35.53	0.032/0.019/40.63	5.25
白安河	7.80	65.51/3.003/95.42	0.3480/0.1030/70.41	0.345/0.312/9.33	0.0587/0.0619/-5.45	0.0870/0.0790/9.20	3.71/2.41/35.04	0.081/0.051/37.04	6.78
板凳垭村河塘	7.27	93.49/3.973/95.75	0.4840/0.0990/79.53	0.789/0.729/7.54	0.0612/0.0593/3.10	0.140/0.138/1.43	8.02/6.21/22.57	0.063/0.044/30.16	4.18

1) A 代表原水,B 代表处理水,C 代表去除率(%)

mg·L⁻¹,但依据《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002),各水源点总磷均超过了 0.3 mg·L⁻¹,为Ⅳ类以下水质水体。对于氨氮指标而言,则狮子湾水库和板凳垭村河塘较高,分别为 0.860 mg·L⁻¹和 0.789 mg·L⁻¹,其他水源水氨氮浓度较低,并且狮子湾水库和板凳垭村河塘的亚硝酸盐氮、硝酸盐氮浓度也远高于其他类型的水源,其 DIN(三氮之和)分别达到 1.177 mg·L⁻¹和 0.990 mg·L⁻¹,超过Ⅲ类地表水标准。TOC 在 3~9 mg·L⁻¹之间,为Ⅱ~Ⅳ类水质水体,其中板凳垭村河塘 TOC 超标严重,水质为低于Ⅴ类水质。由上述不同水源水质状况可知,水源类型,水库大小以及周边环境是影响其水质的重要原因,对于较大水源,如麻子滩水库和跑马滩水库,其水质相对较好,但总磷和 TOC 污染严重,是影响其水源水质的主要指标。而对于小型水源,如狮子湾水库及板凳垭村河塘,则受周边面源污染影响严重,TOC、总氮和总磷均不符合作为水源水的水质标准。

经混凝+沉淀+过滤的常规工艺处理后,浊

度指标去除效果较好,去除率在 95.42%~96.63%之间,处理水浊度可基本达到饮用水标准^[12]的要求。总磷的去除率在 50%~80%之间,但对 TOC、UV₂₅₄、氨氮、硝酸盐氮及亚硝酸盐氮指标去除效果较差,TOC 去除率在 20%~40%之间,UV₂₅₄去除率在 10%~50%之间,这与其他相关研究结论相一致^[3~5,14]。对溶解性的氮,如氨氮、硝酸盐氮和亚硝酸盐氮去除率则很低,氨氮、硝酸盐氮的平均去除率为 7.5%、11.40%,亚硝酸盐氮去除基本没效果,甚至出现亚硝酸盐氮的增加。从以上分析可知,对于西南丘陵地区村镇水源而言,TOC、氮和磷是其主要超标污染物,现有常规处理对其无法有效去除,是该区域饮水安全的主要矛盾。

2.2 有机物分析

2.2.1 有机物相对分子质量分布

不同水源原水及处理水的溶解性有机物分子量分布见图 1,相应相对分子量区间有机物浓度及其去除率见表 2。

表 2 不同相对分子量区间有机物处理前后 TOC 值及去除率¹⁾

Table 2 TOC and removal rate for different molecular weight ranges for raw and treated water

水源点	不同相对分子质量区间 TOC 及去除效果								
	>100×10 ³ A/B/C	(50~100)×10 ³ A/B/C	(30~50)×10 ³ A/B/C	(10~30)×10 ³ A/B/C	(5~10)×10 ³ A/B/C	(3~5)×10 ³ A/B/C	(1~3)×10 ³ A/B/C	(0.5~1)×10 ³ A/B/C	<0.5×10 ³ A/B/C
狮子湾水库	0.19/0.05/73.68	0.17/0.06/64.71	0.41/0.2/51.22	0.98/0.44/55.10	1.08/0.79/26.85	0.69/0.59/14.49	0.65/0.61/6.15	1.05/1.04/0.95	1.66/1.67/-0.60
麻子滩水库	0.2/0.06/70.00	0.19/0.07/63.16	0.31/0.1/67.74	0.68/0.23/66.17	0.52/0.29/44.23	0.44/0.39/11.36	0.31/0.28/9.68	0.49/0.46/6.12	0.67/0.68/-1.49
跑马滩水库	0.18/0.02/88.89	0.24/0.04/83.33	0.31/0.04/87.10	0.91/0.27/70.33	0.73/0.51/30.14	0.55/0.49/10.91	0.61/0.56/8.20	0.79/0.75/5.06	1.90/1.86/2.11
白安河	0.17/0.06/64.71	0.16/0.05/68.75	0.22/0.09/59.09	0.84/0.27/67.86	0.43/0.29/32.56	0.44/0.29/34.10	0.34/0.28/17.65	0.38/0.36/5.26	0.73/0.72/1.37

1) A 代表原水 TOC 值(mg·L⁻¹),B 代表处理水 TOC 值(mg·L⁻¹),C 代表去除率(%)

水中大分子有机物与小分子有机物的相对分子质量没有明显界限,一般以相对分子质量>1×10³的有机物为大分子有机物,<1×10³的有机物为小分子有机物^[7,15,16]。从图 1(a)可知,原水中有有机物以溶解性中小分子有机物为主,相对分子质量<1×10³的有机物占总 TOC 的 50%~80%,其中,中小分子有机物中<0.5×10³的小分子有机物占比最

大,占中小分子有机物的 15%~30%,可能为腐殖质中的富里酸(FA)^[16];其次,占比依次降低的有机物相对分子质量区间是(5~10)×10³(10%~20%)、(0.5~1)×10³(10%~20%)、(3~5)×10³(10%~15%)、(1~3)×10³(5%~10%)。大分子量有机物含量较小,相对分子质量>10×10³的有机物占总 TOC 的 20%~40%,大分子量有机物

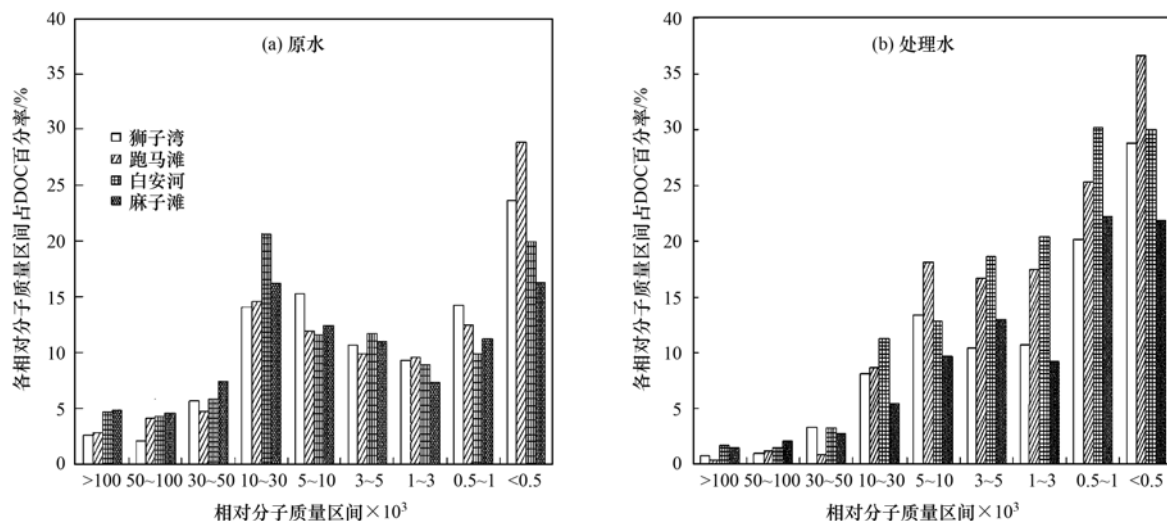


图1 水中有机物相对分子质量分布

Fig. 1 Organic matter molecular weight distribution of raw and treated water

中以 $(10 \sim 30) \times 10^3$ 区间的有机物为主, 占大分子量有机物的 40% ~ 60%, 可能为胡敏酸 (HA)^[16]; 其次, 占比依次降低的有机物相对分子质量区间是 $(30 \sim 50) \times 10^3$ (15% ~ 25%)、 $> 100 \times 10^3$ (10% ~ 15%)、 $(50 \sim 100) \times 10^3$ (5% ~ 15%)。

处理水中有机物则大部分为中小分子有机物, 相对分子质量 $< 10 \times 10^3$ 的有机物占总 TOC 的 70% ~ 90%, 其中, 以相对分子质量 $< 1 \times 10^3$ 的小分子有机物为主, 占中小相对分子质量有机物的 40% ~ 80%。而相对分子质量 $> 10 \times 10^3$ 的有机物则大幅度减小, 只占总 TOC 的 5% ~ 20%。

结合表 1 和表 2 可知, 水质净化常规工艺对原水中溶解性有机物去除率不高, 在 20% ~ 40% 之间, 并且主要去除的是相对分子质量 $> 10 \times 10^3$ 的大分子有机物, 其去除率随着有机物相对分子质量的增加而增大。分子量 $> 10 \times 10^3$ 的有机物, 其去除率在 60% ~ 80% 之间, 其中, 相对分子质量 $> 100 \times 10^3$ 的有机物去除率在 60% ~ 90% 之间; 对小分子质量有机物去除效果极差, 相对分子质量 $< 1 \times 10^3$ 的有机物去除率小于 10%。不同相对分子质量有机物去除率的不同可由不同相对分子质量区间有机物极性差异解释^[14], 大分子有机物憎水性强, 易被混凝沉淀去除, 而小分子有机物亲水性强, 难被混凝沉淀去除。相对分子质量 $< 0.5 \times 10^3$ 的有机物则不能有效去除, 甚至有所增加 (如表 2 中狮子湾原水中 $< 0.5 \times 10^3$ 的有机物 TOC 为 $1.66 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 处理水相应的 TOC 为 $1.67 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 这可能是因为大分子有机物或无机胶体吸附的部分小分子有机物在混凝沉淀过程中由于大分子有机物或胶体与金属离子络

合作用而释放出来所致^[17]。

2.2.2 有机物基团及结构

实验室采用红外光谱仪对不同水源的原水和处理水中有机物进行分子基团结构分析, 其红外光谱图基本一致。文中为方便后文分析, 列出跑马滩水库原水及处理水的红外光谱图, 见图 2。

由红外光谱分析可知, 波峰主要集中在 3 个区域, 即 3400 cm^{-1} 左右、 $3000 \sim 2800 \text{ cm}^{-1}$ 和 $1800 \sim 430 \text{ cm}^{-1}$ 。根据相关研究^[18,19], O—H 键和 C—O 键特征吸收峰值在 $3500 \sim 3200 \text{ cm}^{-1}$ 范围内, 对应醇类物质或酸类物质; 若 O—H 键特征吸收峰值在 $3500 \sim 3200 \text{ cm}^{-1}$ 范围内, 同时 C—O 键特征吸收峰在 $1300 \sim 1200 \text{ cm}^{-1}$ 范围内, 则为酚类物质; C—H 键特征吸收峰位置在 1380 cm^{-1} 和 1470 cm^{-1} 附近及 $(2960 \pm 10) \text{ cm}^{-1}$ 和 $(2570 \pm 10) \text{ cm}^{-1}$, 对应烷类化合物; 羰基化合物主要有醛、酮、酯、酰胺, 醛和饱和酯的吸收峰值都在 1740 cm^{-1} 左右; 酸酐和酸卤的羰基键伸缩振动吸收在 $1870 \sim 1650 \text{ cm}^{-1}$ 之间; 酮的羰基吸收峰在 $1725 \sim 1700 \text{ cm}^{-1}$ 之间; 苯环特征吸收峰在 1600 cm^{-1} 、 1580 cm^{-1} 附近; C—O 键和 C—C 键吸收在 $1275 \sim 1020 \text{ cm}^{-1}$ 之间, C—O—C 键不对称伸缩振动的吸收峰在 $1150 \sim 1060 \text{ cm}^{-1}$ 之间, 对应醚类物质; C=C 键伸缩振动在 $1690 \sim 1560 \text{ cm}^{-1}$, 对应烯烃化合物, 根据指纹区可判断结构特征。

分析不同水源原水和处理水红外光谱图, 在 $3200 \sim 3500 \text{ cm}^{-1}$ 之间存在吸收峰 (如跑马滩原水 3343.93 cm^{-1} 、狮子湾原水 3429.43 cm^{-1} 、狮子湾处理水 3434.45 cm^{-1} 等), 判断存在醇类或酸类; 同

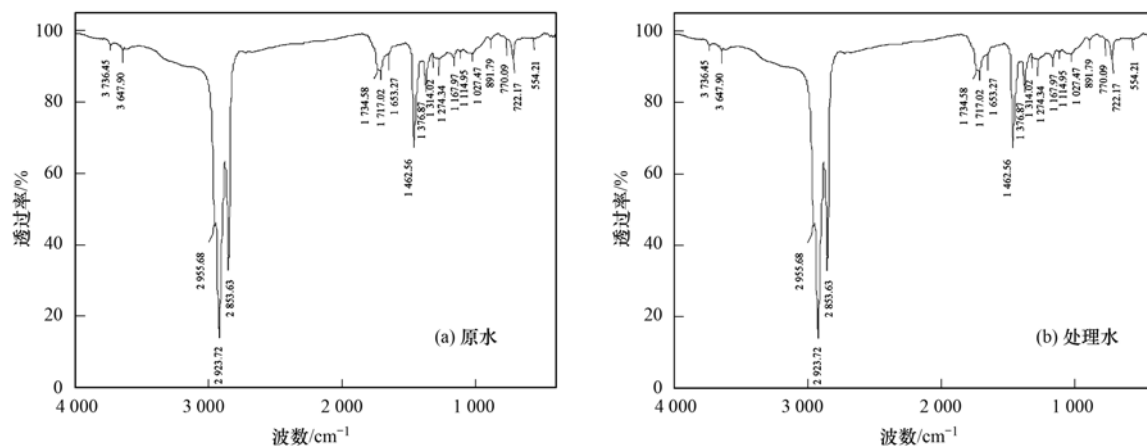


图2 跑马滩水库原水及处理水红外光谱图

Fig. 2 FTIR spectra of raw and treated water from the Paomatan Reservoir

时,在 $1\,300 \sim 1\,200\text{ cm}^{-1}$ 范围内存在吸收峰,(如跑马滩原水 $1\,280.37\text{ cm}^{-1}$ 、狮子湾原水 $1\,259.27\text{ cm}^{-1}$ 、狮子湾处理水 $1\,272.05\text{ cm}^{-1}$),判断存在酚类物质;在 $1\,380\text{ cm}^{-1}$ 和 $1\,470\text{ cm}^{-1}$ 附近及 $(2\,960 \pm 10)\text{ cm}^{-1}$ 和 $(2\,570 \pm 10)\text{ cm}^{-1}$ 处均有强烈吸收,判断烷烃类化合物的确存在;在 $1\,740\text{ cm}^{-1}$ 左右(如跑马滩原水 $1\,735.88\text{ cm}^{-1}$ 、狮子湾原水 $3\,429.43\text{ cm}^{-1}$ 、狮子湾处理水 $3\,434.45\text{ cm}^{-1}$ 等),判断存在醇类、醛类或酸类物质;同时,在 $1\,300 \sim 1\,200\text{ cm}^{-1}$ 范围内存在吸收峰,(如跑马滩原水 $1\,280.37\text{ cm}^{-1}$ 、狮子湾原水 $1\,259.27\text{ cm}^{-1}$ 、狮子湾处理水 $1\,272.05\text{ cm}^{-1}$),判断存在酚类物质;在 $1\,380\text{ cm}^{-1}$ 和 $1\,470\text{ cm}^{-1}$ 附近及 $(2\,960 \pm 10)\text{ cm}^{-1}$ 和 $(2\,570 \pm 10)\text{ cm}^{-1}$ 处均有强烈吸收,判断烷烃类化合物的确存在;在 $1\,870 \sim 1\,650\text{ cm}^{-1}$ 之间有吸收峰(如跑马滩 $1\,735.88$ 、 $1\,714.95$ 、 $1\,653.27\text{ cm}^{-1}$ 等),判断存在酸酐类物质或酸卤物质;在 $1\,725 \sim 1\,700\text{ cm}^{-1}$ 之间有吸收峰(如跑马滩 $1\,714.95\text{ cm}^{-1}$ 、跑马滩处理后 $1\,717.02\text{ cm}^{-1}$ 等),判断存在酮类物质;在 $1\,600$ 、 $1\,580\text{ cm}^{-1}$ 附近存在吸收峰(如跑马滩原水 $1\,602.80\text{ cm}^{-1}$),判断存在苯类物质;在 $1\,275 \sim 1\,020\text{ cm}^{-1}$ 和 $1\,150 \sim 1\,060\text{ cm}^{-1}$ 之间存在吸收峰(如狮子湾 $1\,166.40\text{ cm}^{-1}$ 、 $1\,076.57\text{ cm}^{-1}$),判断存在醚类物质;在 $1\,690 \sim 1\,560\text{ cm}^{-1}$ 之间有吸收峰(如跑马滩原水 $1\,602.80\text{ cm}^{-1}$ 、 $1\,630.80\text{ cm}^{-1}$ 等),判断存在烯烃化合物,且指纹区在 $730 \sim 650\text{ cm}^{-1}$ 范围内有吸收峰(如 722.64 cm^{-1} 、 767.29 cm^{-1} 等),判断 $\text{C}=\text{C}$ 为对称二取代顺式结构。

跑马滩处理水中 $3\,500 \sim 3\,200\text{ cm}^{-1}$ 之间的特征吸收峰消失,可知水质净化常规工艺去除了原水中

的醇类物质或酸类物质;狮子湾处理水中 $1\,725 \sim 1\,700\text{ cm}^{-1}$ 之间的特征吸收峰消失,可知水质净化常规工艺去除了原水中的酮类物质;板凳坪村河塘新增了 $1\,275 \sim 1\,020\text{ cm}^{-1}$ 和 $1\,150 \sim 1\,060\text{ cm}^{-1}$ 之间的特征吸收峰,可知处理水中新增了醚类物质。

2.2.3 有机物定性定量

采用气相色谱-质谱联用分析不同水源原水及处理水中的有机物,主要有机物及其质量浓度见表3。将检测到的有机物分为烷、烯、酚、醇、醛、酯、苯、有机酸等8类主要物质,根据以上各类物质质量浓度算得其占有机物总量的质量分数见表4。

经检测,狮子湾水库、麻子滩水库、跑马滩水库、白安河、板凳坪村河塘源水中分别检测出有机物30种、24种、30种、28种、27种,包括烷类、烯类、醇类、醛类、酮类、酚类、苯类、酯类、酸类、酰胺类、酸酐类、农药、抗生素、内分泌干扰物等14类物质。其中,属于集中式生活饮用水地表水源地特定项目^[12]的有二氯甲烷、三氯甲烷、甲苯、乙苯、二甲苯、邻苯二甲酸二丁酯、丙烯腈、甲醛、乙醛等;特定项目之外的其他物质如特丁津(terbutylazine)^[20,21]、双酚A(bisphenol A, BPA)、食品添加剂2,6-二叔丁基对甲酚(butylhydroxytoluene, BHT)、抗生素萘啶酸(NDA)等。特丁津常为除草剂,具有“三致”作用,且其结构稳定而被微生物矿化过程十分缓慢。双酚A是苯酚、丙酮的衍生物,常用于生产高分子材料,如塑料瓶、眼镜镜片、食品容器等,其在工业中的广泛应用使其易进入水体,进而危害水生生物和人体健康^[22~24]。2,6-二叔丁基对甲酚为常用食品抗氧化剂^[25],有致癌、致畸性^[26],有实验研究表明,它能引

表 3 不同水源水处理前后主要有机物及质量浓度¹⁾/mg·L⁻¹

Table 3 Main organics and their concentrations in the raw and treated water from different water sources/mg·L ⁻¹									
水源地	有机物名称及处理前后的质量浓度/mg·L ⁻¹								
	二氯甲烷	三氯甲烷	6,6-二甲基富烯	环辛四烯	苯酚	2-壬烯-1-醇	月桂醛	2,2,4-三甲基-3-戊酸异丁酯	特丁津
狮子湾水库	0.733/0.434	0.043/0.039	0.078/0.021	0/0	0.723/0.615	0/0	0/0.01	0/0	0/0
麻子滩水库	0.974/0.434	0/0	0.023/0.002	0/0	0.350/0.258	0.013/0	0.006/0.001	0.092/0.002	0/0
跑马滩水库	0.762/0.489	0.037/0	0.054/0	0.035/0	2.004/0.509	0.029/0.003	0.011/0	0.022/0	0.003/0.002
白安河	0.094/0.007	0.008/0.003	0.007/0	0.009/0	0.102/0.132	0.003/0	0/0	0.002/0.0002	0/0
板凳堰村河塘	0.974/0.134	0.023/0.027	0.051/0.015	0.034/0	0.474/0.490	0.026/0.012	0.024/0.005	0.060/0	0.005/0.004

有机物名称及处理前后的质量浓度/mg·L ⁻¹									
水源地	异丁酸丁酯	邻苯二甲酸二丁酯	双酚 A	甲苯	乙苯	2,6-二叔丁基对甲酚	3,5-二叔丁基苯酚	萘啉酸	2,6-二叔丁基对甲酚
狮子湾水库	0/0	1.103/0.112	0.082/0.017	0/0.038	0/0.002	0/0	0.000/0.170	0.044/0.021	0.04/0.038
麻子滩水库	0.014/0.002	0/0	0.092/0.003	0.243/0.019	0/0	0.000/0.033	0.033/0.013	0/0	0.033/0.003
跑马滩水库	0.033/0.003	0.208/0.007	0/0	0.728/0.019	0.076/0.001	0.303/0.008	0/0	0/0	0.303/0.008
白安河	0.003/0.0008	0/0	0/0	0.511/0	0.014/0	0.112/0.000	0/0.004	0/0	0/0
板凳堰村河塘	0.020/0.009	0.054/0.031	0.092/0.067	0.248/0.211	0/0	0/0	0.022/0.154	0/0	0.054/0.022

1) “/”前和后的数字代表原水中和处理后的水中有有机物的质量浓度

表 4 不同水源水处理前后有机物种类及质量分数¹⁾/%

Table 4 Main organic components and their contents in the raw and treated water from different water sources/%									
水源地	有机物种类及质量分数								
	烷类	烯类	酚类	醇类	醛类	酯类	苯类	有机酸类	其他
狮子湾	13.93/17.85	0.20/0.92	50.73/47.09	0.38/9.08	1.18/1.05	18.40/16.99	12.64/5.14	2.71/1.14	0.03/0.74
麻子滩	22.54/55.07	2.52/0.53	31.09/30.88	1.77/0.97	2.22/0.58	21.26/3.05	15.89/4.29	0.75/0.51	1.96/4.63
跑马滩	16.69/49.36	4.86/3.08	55.45/15.56	0.55/3.62	1.07/5.10	5.72/1.68	15.01/16.57	0.29/0	0.36/5.03
白安河	19.69/53.54	4.02/1.30	22.51/36.45	1.86/0.79	5.22/0.24	39.33/3.38	1.51/2.79	0/0	5.86/1.51
板凳堰村河塘	24.14/26.44	6.94/1.89	32.99/34.64	1.45/1.38	3.25/0.25	10.34/5.76	13.92/13.81	6.31/0	0.66/15.83

1) “/”前和后的数字代表原水中和处理后的水中有有机物占有机物总量的质量分数

起老鼠后代脑部产生化学变化,导致非正常行为^[27],人体饮入过量,会对肾脏造成严重伤害.在狮子湾水库中检测到的萘啉酸,属第一代喹诺酮类抗生素,能有效治疗肾盂肾炎等由细菌感染引起的炎症,但近年来,该类物质在牛奶中残留进而危害人类健康的现象普遍发生,各国已发布相关法规^[28],对牛奶中的喹诺酮类药物作了限量规定.显然,水源水中出现这类物质,是应当引起重视的.

从表3可知,二氯甲烷、苯酚、邻苯二甲酸二丁酯浓度较高,二氯甲烷浓度在0.09~1 mg·L⁻¹之间,苯酚浓度在0.1~2.5 mg·L⁻¹之间,邻苯二甲酸二丁酯浓度在0.5~1.5 mg·L⁻¹之间,其浓度远超出饮用水标准限值^[29].跑马滩水库中苯酚浓度极高,为2.004 mg·L⁻¹,因其横跨乐至和安居两县市,受工业污染严重而致.从表4可知,原水中酚、烷、酯、苯类含量较高,酚类占总体有机物的20%~60%,烷类占总体有机物的15%~30%,酯类占总体有机物的10%~40%左右,苯类占总体有机物的10%~20%左右.醛、烯、醇、有机酸类物质(比如

萘啉酸)则含量较小,所占比例大多不超过5%.

处理水中酯类、有机酸类在总的有机物中占比比原水有所减少,有机酸几乎完全去除,红外光谱中有机酸的吸收峰消失,能得到同样的结论.而主要有机物如醛类、烷类、烯类、苯类、酚类物质所占比例增减不一,去除效果不理想,这与红外光谱图中处理前后基团的出现结果表现一致.其中,出水中的致癌物二氯甲烷的去除率虽然在30%以上,但处理水中其浓度仍超标^[29](标准限值:0.02 mg·L⁻¹,除白安河外,其他水源点处理水中二氯甲烷浓度均大于0.02 mg·L⁻¹,在0.1~0.5 mg·L⁻¹之间).三氯甲烷、苯类、酚类等有毒物质去除不稳定,甚至有所增加,可见,水质净化常规工艺对致癌性有机物不能有效去除,尤其应引起饮水处理的关注.

3 结论

(1)西南丘陵区村镇典型供水水源受到不同程度污染,为微污染水源水.水中有有机物以中小分子有机物为主,不同水源原水中,<10×10³的有机物

占总 TOC 的 50% ~ 80%, 相应处理水中占总 TOC 的 70% ~ 90%。由于大分子有机物去除效果好, 则处理水中小分子有机物占比增大。

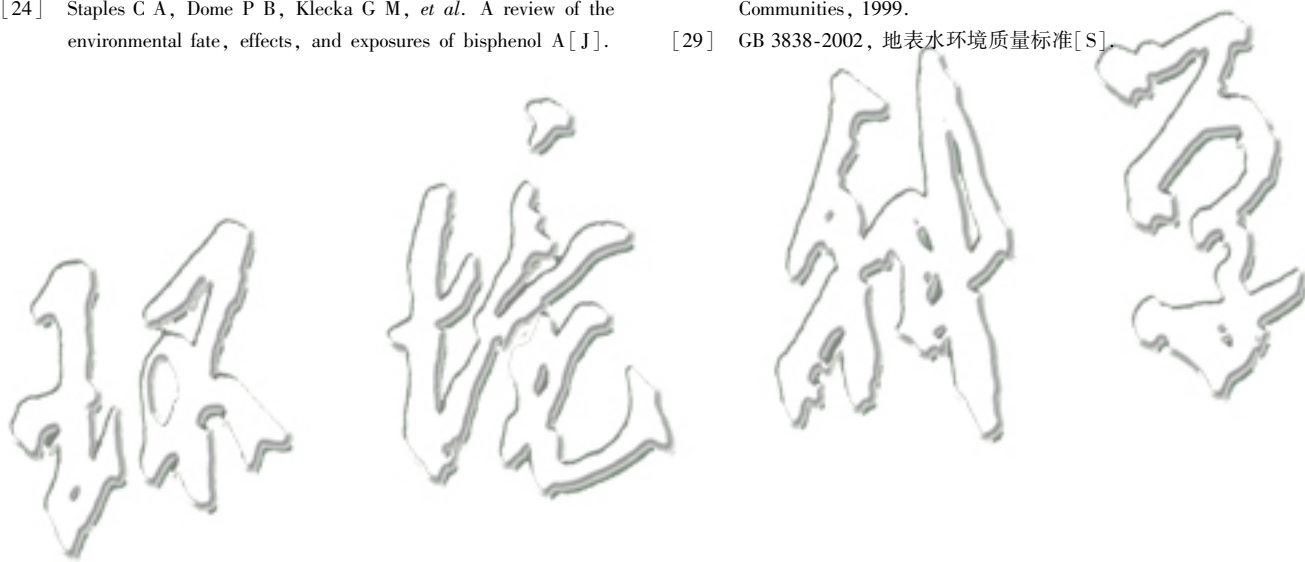
(2) 通过红外光谱对有机物基团结构分析, 水中存在烷烃、烯烃、酚、苯、醇、醛、酯、醚、酮、酸类物质。

(3) 通过气质联用对有机物定性定量分析, 不同水源水中共检测到 53 种共 14 类有机物, 包括烷烃、烯烃、酚、苯、醇、醛、酯、酮、酸、酰胺类、酸酐类、农药、抗生素、内分泌干扰物, 验证了红外光谱分析结果。其中, 以烷烃、酚、酯和苯类物质为主, 占总有机物的 80% ~ 90% 左右, 有机酸、烯烃、醇和醛类物质质量浓度较小, 占总有机物的 5% ~ 20% 左右。二氯甲烷、苯酚、邻苯二甲酸二丁酯等物质质量浓度较高, 并检测到除草剂、食品添加剂、抗生素等污染物, 如特丁津、2,6-二叔丁基对甲酚、萘啶酸等, 以上物质应引起饮水处理的重视。

参考文献:

- [1] 马蔚, 盛卉. 汨汨清流润心田——“十二五”时期我国解决农村饮水安全问题纪实[N]. 经济日报, 2016-01-11(3).
- [2] 杨林章, 冯彦房, 施卫明, 等. 我国农业面源污染治理技术研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(1): 96-101.
Yang L Z, Feng Y F, Shi W M, *et al.* Review of the advances and development trends in agricultural non-point source pollution control in China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(1): 96-101.
- [3] 韩晓刚, 黄廷林. 水厂常规工艺去除有机物和总磷[J]. 环境工程学报, 2013, 7(5): 1616-1620.
Han X G, Huang T L. Removal efficiency of organics and total phosphorus in conventional process of water plants[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2013, 7(5): 1616-1620.
- [4] 宋澄杰, 杜尔登, 王利平, 等. 饮用水预处理和深度处理工艺对有机物去除的特征研究[J]. 中国农村水利水电, 2014, (10): 13-18.
Song C J, Du E D, Wang L P, *et al.* The removal characteristics of organic matter by pre-treatment process and advanced treatment process in water treatment works[J]. China Rural Water and Hydropower, 2014, (10): 13-18.
- [5] 刘武平, 吕锡武, 朱光灿, 等. 常规处理与深度处理工艺对南京长江原水中有机物去除效能比较[J]. 净水技术, 2012, 31(2): 24-29.
Liu W P, Lv X W, Zhu G C, *et al.* Comparison of organic matters removal efficiency between conventional and advanced treatment processes for Yangtze River raw water in Nanjing[J]. Water Purification Technology, 2012, 31(2): 24-29.
- [6] 高梦鸿, 高乃云, 周金金, 等. 由混凝或气浮构成的组合工艺处理太湖原水比较[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2014, 46(8): 90-95.
Gao M H, Gao N Y, Zhou J J, *et al.* Comparison of pilot effect between sedimentation and dissolved air flocculation for the treatment of Taihu Lake water[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2014, 46(8): 90-95.
- [7] 韩瑾, 李星, 杨艳玲, 等. 东江水源水有机物分子量分布及其处理工艺选择[J]. 北京工业大学学报, 2013, 39(1): 87-91.
Han J, Li X, Yang Y L, *et al.* Organic matter molecular weight distribution and process selection for the raw water of East River[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2013, 39(1): 87-91.
- [8] 刘增军, 童祯恭, 侯煜堃, 等. 原水有机物分子量分布及去除特性研究——基于北方某水厂实测数据[J]. 华东交通大学学报, 2014, 31(4): 123-129.
Liu Z J, Tong Z G, Hou Y K, *et al.* Molecular weight distribution and removal of raw water organics based on measured data of North China's water plant[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2014, 31(4): 123-129.
- [9] Imai, Fukushima T, Matsushige K, *et al.* Fractionation and characterization of dissolved organic matter in a shallow eutrophic lake, its inflowing rivers, and other organic matter sources[J]. Water Research, 2001, 35(17): 4019-4028.
- [10] 龙小庆, 王占生. 活性炭-纳滤膜工艺去除饮用水中总有机碳和 Ames 致突变物[J]. 环境科学, 2001, 22(1): 75-77.
Long X Q, Wang Z S. Removal of TOC and Ames mutagens from drinking water using AC-NF process[J]. Environmental Science, 2001, 22(1): 75-77.
- [11] Chang C N, Chao A, Lee F S, *et al.* Influence of molecular weight distribution of organic substances on the removal efficiency of DBPs in a conventional water treatment plant[J]. Water Science and Technology, 2000, 41(10-11): 43-49.
- [12] GB 5749-2006, 生活饮用水卫生标准[S].
- [13] 胡锦涛. 胡锦涛总书记、温家宝总理、回良玉副总理关于农村饮水解困的重要批示和论述[J]. 中国水利, 2004, (21): 5.
- [14] 王占生, 刘文君. 微污染源饮用水处理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999. 57-60.
- [15] 李公伟, 张奇, 卞荣星, 等. 纳滤浓缩液腐殖质组成及分子量分布特性[J]. 环境工程, 2016, 34(10): 31-34.
Li G W, Zhang Q, Bian R X, *et al.* Composition and molecular weight distribution of humic substances in nanofiltration concentrate[J]. Environmental Engineering, 2016, 34(10): 31-34.
- [16] 朱文倩, 徐斌, 林琳, 等. 微污染源中溶解性有机氮组成规律及其水处理特性[J]. 中国环境科学, 2014, 34(1): 130-135.
Zhu W Q, Xu B, Lin L, *et al.* Studies on dissolved organic nitrogen compositions and water-treatment behavior in micro-polluted water[J]. China Environmental Science, 2014, 34(1): 130-135.
- [17] 施锦岳, 张玉先, 包卫彬. 姚江水源水有机物分子量分布[J]. 云南环境科学, 2005, 24(S1): 125-126.
Shi J Y, Zhang Y X, Bao W B. Distribution of molecular weight of organic material of water source in Yaojiang River[J]. Yunnan Environmental Science, 2005, 24(S1): 125-126.
- [18] Silverstein R M, Webster F X, Kiemle D J. Spectrometric identification of organic compounds[M]. Shanghai: East China University of Science and Technology Press, 2007.
- [19] 姜小萍. 红外光谱定性解析原则[J]. 张家口师范专科学校学报, 2001, 17(6): 56-58.

- Jiang X P. About the Principl of IR in the characteristics of analyses[J]. Journal of Zhangjiakou Teachers College, 2001, **17**(6): 56-58.
- [20] 王贵启, 张秀仿. 农药与环境安全国际会议论文集[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2005. 510-514.
- [21] 连玉朱, 王金信, 李龙森, 等. 特丁津与扑草净、莠去津活性比较[J]. 农药科学与管理, 2005, **26**(11): 23-25.
- Lian Y Z, Wang J X, Li L S, *et al.* Biological activity comparison of terbuthylazine with prometryn and atrazine[J]. Pesticide Science and Administration, 2005, **26**(11): 23-25.
- [22] Mountfort K A, Kelly J, Jickells S M, *et al.* Investigations into the potential degradation of polycarbonate baby bottles during sterilization with consequent release of bisphenol A[J]. Food Additives & Contaminants, 1997, **14**(1-7): 737-740.
- [23] 徐红梅, 江云, 谢庆效, 等. 双酚 A 对昆明小鼠免疫毒性的研究[J]. 环境科学学报, 2015, **35**(9): 3013-3019.
- Xu H M, Jiang Y, Xie Q X, *et al.* Immunotoxicity of bisphenol A on Kunming mice[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, **35**(9): 3013-3019.
- [24] Staples C A, Dome P B, Klecka G M, *et al.* A review of the environmental fate, effects, and exposures of bisphenol A[J]. Chemosphere, 1998, **36**(10): 2149-2173.
- [25] 段文仲, 马育松, 庞津霞. 新欧盟指令对塑料食品接触材料产业影响及对策研究[J]. 塑料包装, 2011, **21**(6): 23-28.
- Duan W Z, Ma Y S, Pang J X. New EU directives lead to influence and countermeasures research for the food plastic packaging and related industrieslevels[J]. Plastics Packaging, 2011, **21**(6): 23-28.
- [26] Umemura T, Kodama Y, Hioki K, *et al.* Butylhydroxytoluene (BHT) increases susceptibility of transgenic rash2 mice to lung carcinogenesis[J]. Journal of Cancer Research and Clinical Oncology, 2001, **127**(10): 583-590.
- [27] 刘志刚, 王志伟. 塑料包装材料化学物向食品迁移的模型研究进展[J]. 高分子材料科学与工程, 2007, **23**(5): 19-23.
- Liu Z G, Wang Z W. Study on mathematical model for predicting migration of chemical substances from plastic packaging materials[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2007, **23**(5): 19-23.
- [28] European Union. Commission Regulation (EC) No 508/1999 of 4 March1999 [Z]. Official Journal of the European Communities, 1999.
- [29] GB 3838-2002, 地表水环境质量标准[S].



CONTENTS

Variation of O ₃ Concentration in Different Regions of Beijing from 2006-2015	WANG Zhan-shan, LI Yun-ting, AN Xin-xin, <i>et al.</i>	(1)
Source Apportionment of Black Carbon Aerosol in the North Suburb of Nanjing	XIAO Si-han, YU Xing-na, ZHU Bin, <i>et al.</i>	(9)
Seasonal Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in PM ₁₀ Around Electroplating Plants	ZHAO Zhen-li, ZHAO Wei-tuo, HUANG Ting, <i>et al.</i>	(18)
Characteristics of Organic and Elemental Carbon in PM ₁₀ and PM _{2.5} in Yulin City, Guangxi	HUANG Jiong-li, CHEN Zhi-ming, MO Zhao-yu, <i>et al.</i>	(27)
Concentrations and Compositions of Different Forms of Nitrogen and Phosphorus in Atmospheric Aerosols in the Qingdao Coastal Region and over the Yellow and Bohai Sea	ZHANG Rui-feng, QI Jian-hua, DING Xue, <i>et al.</i>	(38)
Air Quality Subarea Management: A case study of Guangdong Province	YANG Liu-lin, LI Min-hui, LIAO Cheng-hao, <i>et al.</i>	(49)
Remote Sensing Identification of Urban Black-Odor Water Bodies Based on High-Resolution Images; A Case Study in Nanjing	WEN Shuang, WANG Qiao, LI Yun-mei, <i>et al.</i>	(57)
Simulation of Nitrate Isotopic ($\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{18}\text{O}$) by Coupling the Hydrology and Transport Processes Described by the SWAT Model	WANG Kang, RAN Ning, LIN Zhong-bing, <i>et al.</i>	(68)
Estimation of and Control Strategies for Pollution Loads from Non-point Sources in the Chenghai Watershed	CHEN Xue-kai, LIU Xiao-bo, PENG Wen-qi, <i>et al.</i>	(77)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Metals in Drinking Water Sources from the Luhun Reservoir	YU Cong-cong, ZHAO Wei-tuo, GAO Xiao-feng, <i>et al.</i>	(89)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Antibiotics in the Water Supply System in Tianjin	ZHANG Xin-bo, SONG Zi, ZHANG Dan, <i>et al.</i>	(99)
Organic Distribution Characteristics and Influence on Drinking Water Quality in the Typical Water Sources for Towns in the Southwest Hilly Area of China	WANG Qiong, LI Nai-wen, LI Lei, <i>et al.</i>	(109)
Health Risk Evaluation of Organochlorine and Organophosphorous Pesticides in Groundwater in Beijing	CHEN Wei-ping, PENG Cheng-wei, YANG Yang, <i>et al.</i>	(117)
Pollution Status and Risks of Dioxin-like Polychlorinated Biphenyls in the Soil of the Yellow River	YAO Hong, LU Shuang, ZHANG Xu, <i>et al.</i>	(123)
Effects of Flooding and Drying on the Transformation of Soil Inorganic Phosphorus in the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir, China	ZHOU Jian, LI Chun-hui, ZHANG Zhi-yong, <i>et al.</i>	(130)
Effect of Phosphate on the Ammonium Removal Performance of Iron-Manganese Co-oxide Film in Surface Water Treatment	ZHUO Rui-shuang, HUANG Ting-lin, ZHANG Rui-feng, <i>et al.</i>	(137)
Enhanced Photoelectrocatalytic Oxidation of Cu(CN) ₃ ²⁻ and Synchronous Cathodic Deposition of Cu by Peroxydisulfate	DANG Cong-zhe, LI Yi-bing, WANG Yan-bin, <i>et al.</i>	(145)
Using HKUST-1 as a Template for Copper Oxides Preparation to Activate Peroxymonosulfate for RhB Degradation	PU Jia-yi, WAN Jin-quan, WANG Yan, <i>et al.</i>	(152)
Evaluation of Performance of an Aminated Rosin-based Resin for Adsorption of Norfloxacin from Aqueous Solutions	MA Ya-hong, HUANG Wan-ting, DIAO Kai-sheng, <i>et al.</i>	(161)
Arsenic(V) Removal by Granular Adsorbents Made from Backwashing Residuals from Biofilters for Iron and Manganese Removal	ZENG Hui-ping, LÜ Sai-sai, YANG Hang, <i>et al.</i>	(170)
Arsenic Adsorption and Its Species on Ferrihydrite and Ferrihydrite Colloid	MA Yu-ling, MA Jie, CHEN Ya-li, <i>et al.</i>	(179)
Comparison of Amphoteric-Cationic and Amphoteric-Anionic Modified Magnetic Bentonites: Characterization and Sorption Capacity of Phenol	REN Shuang, MENG Zhao-fu, WANG Teng, <i>et al.</i>	(187)
Pollution Characteristics of Parabens in Typical Sewage Wastewater	ZHAO Xue, ZHANG Zi-feng, ZHU Fu-jie, <i>et al.</i>	(195)
Influence of Hydraulic Retention Time on the Treatment of Polluted River Water by an Activated Carbon Rotating Biological Contactor	XU Wen-jia, CHENG Xiao-ying, <i>et al.</i>	(202)
Removal and Influence of Ciprofloxacin in a Membrane Bioreactor	DAI Qi, LIU Rui, SHU Xiao-ming, <i>et al.</i>	(212)
Operation of the AAO Process Under Low Dissolved Oxygen Conditions and Its Simulation	CAO Te-te, WANG Lin, LI Yong-mei, <i>et al.</i>	(219)
Inhibitory Effects of Phosphate and Recovery on a Nitrification System	GU Cheng-wei, CHEN Fang-min, LI Xiang, <i>et al.</i>	(227)
Effect of Carbon Source on Lab-scale SAD Process in a Wastewater Treatment Plant	LI Dong, ZHAO Shi-xun, WANG Jun-an, <i>et al.</i>	(232)
Effect of Volume Loading Rate (VLR) on Denitrifying Phosphorus Removal by the ABR-MBR Process	LÜ Liang, YOU Wen, WEI Jia-min, <i>et al.</i>	(239)
Combined Process of DNB-F-O ₃ -GAC for Nitrogen and Phosphorus and Metabolite Advanced Removal	ZHONG Li-yan, HAO Rui-xia, WANG Wei-dong, <i>et al.</i>	(247)
Influence of Operating Modes for the Alternating Anoxic/Oxic Process on Biological Nitrogen Removal and Extracellular Polymeric Substances of Activated Sludge	SUN Hong-wei, CHEN Cui-zhong, WU Chang-feng, <i>et al.</i>	(256)
Effects of Nanoscale Zero-valent Iron (nZVI) on Denitrifying Performance of an Upflow Granular Sludge Bed Reactor	ZHOU Feng, WANG Fan-fan, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i>	(263)
Influence on Desulfurization Efficiency and Interactions of Fe/S and pH During H ₂ S in situ Depression of High Solid Anaerobic Digestion	HAN Yun, CAO Yu-qin, ZHUO Yang, <i>et al.</i>	(269)
Analysis of Storage Sludge Composition Characteristics and Evolutionary Regularity in the Hunhe River Basin	LIU Tian-tian, CUI Chong-wei, HE Jun-guo, <i>et al.</i>	(276)
Enhancement of Anaerobic Methane Production by Removal of Organic-bonding Metals from Sewage Sludge	LU Yi-qing, XU Ying, DONG Bin, <i>et al.</i>	(284)
Comparison of Different Leaching Methods for Heavy Metals in Sludge Fly Ash and Comprehensive Toxicity Evaluation	WANG Feng, LI Run-dong, LI Yan-long, <i>et al.</i>	(292)
Diurnal Variations of CH ₄ and N ₂ O Fluxes from the Drained Aquaculture Pond in the Minjiang River Estuary During Early Winter	YANG Ping, TAN Li-shan, HUANG Jia-fang, <i>et al.</i>	(300)
Effects of Three Soil Amendments on Greenhouse Gas Emissions From Corn Fields in the Hetao Irrigation District	WU Yan, HONG Mei, LIN Li-long, <i>et al.</i>	(310)
Effect of Organic Manure Substitution of Synthetic Nitrogen on Crop Yield and N ₂ O Emission in the Winter Wheat-Summer Maize Rotation System	HOU Miao-miao, LÜ Feng-lian, ZHANG Hong-tao, <i>et al.</i>	(321)
Dynamics of Rice Photosynthesized Carbon Input and Its Response to Nitrogen Fertilization at the Jointing Stage: ¹³ C-CO ₂ Pulse-labeling	CHEN Shan, ZHU Zhen-ke, YUAN Hong-zhao, <i>et al.</i>	(331)
Profile Distribution of Soil Organic and Inorganic Carbon Under Different Land Use Types in the Loess Plateau of Northern Shaanxi	LAN Zhi-long, ZHAO Ying, ZHANG Jian-guo, <i>et al.</i>	(339)
Effect of Biochar on Ammonia Volatilization from Soils of Different Surface Conditions	ZOU Juan, HU Xue-yu, ZHANG Yang-yang, <i>et al.</i>	(348)
Effects of Straw and Biochar Return in Soil on Soil Aggregate and Carbon Sequestration	XU Guo-xin, WANG Zi-fang, GAO Ming, <i>et al.</i>	(355)
Assessment of the Availability of Soil Copper and Related Influencing Factors at a County Scale	LI Jin-fen, QU Ming-kai, LIU Gang, <i>et al.</i>	(363)
Application of the LUR Model in the Prediction of Spatial Distributions of Soil Heavy Metals	ZENG Jing-jing, SHEN Chun-zhu, ZHOU Sheng-lu, <i>et al.</i>	(371)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soils of Shenyang North New Area	LI Jia-kang, SONG Xue-ying, WEI Jian-bing, <i>et al.</i>	(379)
Passivation of Simulated Pb- and Cd-Contaminated Soil by Applying Combined Treatment of Phosphate, Humic Acid, and Fly Ash	ZHAO Qing-yuan, LI Xiao-ming, YANG Qi, <i>et al.</i>	(389)
Distribution and Accumulation of Cadmium in Paddy Soil and Rice Affected by Pollutant Sources Control and Improvement Measures	FENG Wen-li, GUO Zhao-hui, SHI Lei, <i>et al.</i>	(399)
Differences in Cd Accumulation in Typical Soils Under the Double Rice System	LI Xin-yang, LONG Jian, WANG Shu-bing, <i>et al.</i>	(406)
Distribution Characteristics of Mercury in Reed Leaves from the Jiapiougou Gold Mine in the Songhua River Upstream	ZHANG Man-yin, LI Meng-jie, CUI Li-juan, <i>et al.</i>	(415)
Effect of Nitrate Amendment on Soil Denitrification Activity and Anthracene Anaerobic Degradation	DAI Jun-shuai, ZUO Xiao-hu, WANG Ming-xia, <i>et al.</i>	(422)
Effects of Long-term Fertilization Regimes on Microbial Biomass, Community Structure and Activity in a Paddy Soil	WANG Wei-hua, LIU Yi, TANG Hai-ming, <i>et al.</i>	(430)
Analysis of Sulfate-Reducing and Sulfur-Oxidizing Prokaryote Community Structures in Marine Sediments with Different Sequencing Technologies	ZHANG Yu, MI Tie-zhu, ZHEN Yu, <i>et al.</i>	(438)
Seasonal and Spatial Variations of Microcystins and Their Relationships with Physicochemical and Biological Factors in Poyang Lake	YUAN Li-juan, LIAO Qie-gen, ZHANG Li, <i>et al.</i>	(450)
Distribution of Multidrug-Resistant Bacteria and Antibiotic-Resistant Genes in Livestock Manures	ZHANG Hao, WANG Pan-liang, YANG Qing-xiang, <i>et al.</i>	(460)
Influence of Air Pollution Control (APC) Systems and Furnace Type on the Characteristics of APC Residues from Municipal Solid Waste Incinerators	ZHANG Hua, YU Si-yuan, SHAO Li-ming, <i>et al.</i>	(467)