

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第10期

Vol.37 No.10

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目 次

北京地区空气重污染下雾凇和偏东风对 PM _{2.5} 清除作用	孙兆彬, 廖晓农, 王占山, 李梓铭, 赵秀娟, 花丛 (3679)
降雨对不同粒径气溶胶粒子碰撞清除能力	董群, 赵普生, 陈一娜 (3686)
北京冬季雾霾频发期 VOCs 源解析及健康风险评价	刘丹, 解强, 张鑫, 王海林, 闫志勇, 杨宏伟, 郝郑平 (3693)
浙江省制鞋行业挥发性有机物污染特征及其排放系数	徐志荣, 姚轶, 蔡卫丹, 李嫣, 许明珠, 王浙明 (3702)
2014 年 APEC 期间北京市 PM ₁₀ 和 PM _{2.5} 氧化性损伤能力研究	郭茜, 邵龙义, 王文华, 侯聪, 赵承美, 幸娇萍, 马施民 (3708)
武汉市洪山区夏季 PM _{2.5} 浓度、水溶性离子与 PAHs 成分特征及来源分析	孙焰, 祁士华, 张莉, 邢新丽, 杨丹, 胡天鹏, 瞿程凯 (3714)
基于快速聚类方法分析常州市区 PM _{2.5} 的统计特性	王振, 余益军, 徐圆青, 李艳萍, 夏京, 殷磊 (3723)
PM _{2.5} 在线水溶性离子与滤膜采集-实验室检测的比对分析	杨懂艳, 刘保献, 石爱军, 张大伟, 丁萌萌, 周健楠, 富佳明, 景宽 (3730)
树木模拟燃烧排放烟尘中水溶性离子的组成	刘刚, 黄柯, 李久海, 徐慧 (3737)
轻型汽油车排放颗粒物数浓度和粒径分布特征	樊筱筱, 蒋靖坤, 张强, 李振华, 何立强, 吴烨, 胡京南, 郝吉明 (3743)
基于台架测试的我国船用柴油机废气排放因子	邢辉, 段树林, 黄连忠, 韩志涛, 刘勤安 (3750)
西安城区地表灰尘中邻苯二甲酸酯分布、来源及人群暴露	张文娟, 王利军, 王丽, 史兴民, 卢新卫 (3758)
生活垃圾焚烧厂垃圾的汞含量与汞排放特征研究	段振亚, 苏海涛, 王凤阳, 李智坚, 李韶璞, 王书肖 (3766)
三峡库区消落带土壤中硫酸盐还原菌对汞甲基化作用的影响	陈瑞, 陈华, 王定勇, 向玉萍, 申鸿 (3774)
城市化进程对地下河中溶解态正构烷烃来源的影响	廖昱, 孙玉川, 沈立成, 梁作兵, 王尊波 (3781)
基于 PMF 模型的长江流域水体中多环芳烃来源解析及生态风险评价	王成龙, 邹欣庆, 赵一飞, 李宝杰 (3789)
贡嘎山地区地表水化学特征及水环境质量评价	何晓丽, 吴艳宏, 周俊, 邝海健 (3798)
多元数理统计法研究太子河本溪城市段水体 DOM 紫外光谱特征	钱锋, 吴婕, 于会彬, 宋永会, 张美, 孔令昊, 何孟常 (3806)
地下水中溶解性有机物的垂直分布特征及成因	何小松, 张慧, 黄彩红, 李敏, 高如泰, 李丹, 席北斗 (3813)
昆明市不同功能区排水管道沉积物性质	常海东, 金鹏康, 付博文, 李雪兵, 贾锐珂 (3821)
滇池水生植物分布对沉积物间隙水磷浓度的影响	丁帅, 王圣瑞, 张蕊, 肖焱波, 焦立新, 李乐, 王忠诚, 尹诗诗 (3828)
紫色母岩覆盖层控制底泥磷释放的效果及机制	黄雪娇, 石纹豪, 倪九派, 李振轮 (3835)
排水循环灌溉下稻田磷素时空分布特征	焦平金, 许迪, 朱建强, 于颖多 (3842)
快速高效去除微囊藻的 GO/QPEI 复合纳米材料	李洁, 肖琳 (3850)
一体式生物净化-沉淀池对微污染水体污染物的强化去除性能	王文东, 刘荟, 马翠, 韩雨, 常妮妮 (3858)
生物粉末活性炭-超滤组合工艺对微污染水源水中嗅味物质的去除效能及其微生物特性	宣雍祺, 周丽, 邓慧萍, 蔡宙, 李大鹏, 刘刚 (3864)
聚硅酸对不同形态铝沉积行为的影响	赵园园, 张玥, 李素英, 石宝友, 李贵伟, 孙改清 (3870)
典型南方水源氨基酸浓度变化与去除	刘伟, 蔡广强, 卢小艳, 刘丽君, 张金松, 刘嘉祺, 曲莹 (3877)
O ₃ /UV 降解含氮杂环化合物喹啉	陈傲蕾, 常凤民, 汪翠萍, 徐恒, 吴静, 左剑恶, 王凯军 (3884)
蒽醌-2-磺酸钠促进 <i>Klebsiella oxytoca</i> GS-4-08 脱色产氢机制与产能分析	胡金梅, 虞磊, 黄天寅 (3891)
2-丁烯醛生产废水中溶解性有机物的分级解析	孙秀梅, 宋广清, 席宏波, 周岳溪, 牛远方 (3899)
不同缺氧段硝酸盐氮浓度条件下连续流单污泥污水处理系统 PHA、TP 代谢	王晓玲, 员东丹, 白莉, 李紫棋, 余勇, 秦旭东, 张晓旭, 赵可 (3906)
长江口邻近海域沉积物中厌氧氨氧化细菌分布特征研究	付璐璐, 甄毓, 贺惠, 张玉, 米铁柱 (3914)
焦化废水活性污泥细菌菌群结构分析	蒙小俊, 李海波, 曹宏斌, 盛宇星 (3923)
黄土高原不同植被类型下土壤细菌群落特征研究	刘洋, 黄懿梅, 曾全超 (3931)
苯酚对活性污泥活性及微型动物群落结构的影响	胡小兵, 饶强, 唐素兰, 姜晶, 谢瑞桃, 郝文静, 钟梅英 (3939)
城市生活污水和生活垃圾渗滤液抗生素抗性基因污染的比较研究	黄福义, 李虎, 安新丽, 欧阳纬莹, 苏建强 (3949)
菌株 <i>Desulfovibrio</i> sp. CMX 的 DNRA 性能和影响因素	谢柄柯, 张玉, 王晓伟, 孙超越, 周集体 (3955)
生活污水灌溉对麦秸还田稻田氨挥发排放的影响	徐珊珊, 侯朋福, 范立慧, 薛利红, 杨林章, 王绍华, 李刚华 (3963)
模拟氮沉降对重庆缙云山马尾松林土壤呼吸和酶活性的季节性影响	曾清苹, 何丙辉, 李源, 夏力文, 杨龙龙, 邓雪梅, 李川 (3971)
生物炭添加和灌溉对温室番茄地土壤反硝化损失的影响	张文娟, 余冬立, Gamareldawla H. D. Agbna, 夏永秋 (3979)
土壤质地对自养固碳微生物及其同化碳的影响	王群艳, 吴小红, 祝贞科, 袁红朝, 隋方功, 葛体达, 吴金水 (3987)
土壤-作物系统中重金属元素吸收、迁移和积累过程模拟	施亚星, 吴绍华, 周生路, 王春辉, 陈浩 (3996)
组配改良剂对稻田系统 Pb、Cd 和 As 生物有效性的协同调控	王英杰, 邹佳玲, 杨文强, 周航, 廖柏寒 (4004)
几种有机物料对设施菜田土壤 Cd、Pb 生物有效性的影响	周贵宇, 姜慧敏, 杨俊诚, 张建峰, 张水勤, 梁雷 (4011)
蒙脱石对有机物料施入土壤磷形态和有效性的影响	宋贤威, 赵秀兰, 张进忠, 胡梦坤, 徐艳昭, 王明禹 (4020)
不同镉浓度及 pH 条件下纳米沸石对土壤镉形态及大白菜镉吸收的影响	秦余丽, 熊仕娟, 徐卫红, 赵婉伊, 王卫中, 陈永勤, 迟芬琳, 陈序根, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体 (4030)
黑麦草和牵牛花对铬耐受能力和积累效果的指标表征研究	董冰冰, 陈友媛, 惠红霞, 陆维佳, 杨秀卿, 刘逸凡 (4044)
挥发性甲基硅氧烷的体外代谢行为	黎敏丹, 郑国贸, 万伟, 胡建英 (4054)
中药渣与城市污泥好氧共堆肥的效能	宿程远, 郑鹏, 阮祁华, 覃菁菁, 卢宇翔, 李俊兵 (4062)
《环境科学》征订启事 (3827)	《环境科学》征稿简则 (4053)
信息 (3736, 3930, 4043)	

典型南方水源氨基酸浓度变化与去除

刘伟¹, 蔡广强², 卢小艳², 刘丽君², 张金松^{1,2*}, 刘嘉祺², 曲莹²

(1. 哈尔滨工业大学深圳研究生院, 深圳 518055; 2. 深圳市水务(集团)有限公司, 深圳 518031)

摘要: 氨基酸是天然水体中含氮有机物的重要组成部分, 为明晰氨基酸在水库原水中的浓度变化及去除情况, 于 2015 年 5 ~ 10 月利用高效液相色谱法(HPLC)对我国南方某市 3 个主要水库原水中 20 种常见氨基酸浓度进行连续监测, 分析该市水库原水中氨基酸的空间分布与变化趋势, 同时研究了不同处理工艺对氨基酸的去除情况。结果表明, 不同水库原水中氨基酸组成有所差异, 但主要氨基酸为天冬氨酸、半胱氨酸、亮氨酸。水库 C 原水中各氨基酸含量没有明显季节性变化趋势, 但夏季含量相对较低, 秋季相对较高。此外, 常规工艺与 BAC-UF 工艺对氨基酸的主要去除单元为混凝沉淀单元, O₃-BAC 工艺对氨基酸的主要去除单元为主臭氧。常规工艺、BAC-UF 工艺、O₃-BAC 工艺对氨基酸总量的总去除率分别为 94.42%、66.04%、49.75%。

关键词: 南方水源; 氨基酸; 分布; 工艺; 去除

中图分类号: X131.2 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)10-3877-07 DOI: 10.13227/j.hjkk.2016.10.028

Concentration Variation and Removal of Amino Acids in Typical Drinking Sources in the South of China

LIU Wei¹, CAI Guang-qiang², LU Xiao-yan², LIU Li-jun², ZHANG Jin-song^{1,2*}, LIU Jia-qi², QU Ying²

(1. Shenzhen Graduate School, Harbin Institute of Technology, Shenzhen 518055, China; 2. Shenzhen Water Affairs (Group) Co., Ltd., Shenzhen 518031, China)

Abstract: Amino acids are the main components of nitrogenous organic matter in surface water. In order to reveal the concentration variation and removal of amino acids in reservoirs water, the concentration variation of the twenty common amino acids for three main reservoirs' water in a typical southern city of China was monitored between May and October in the year of 2015 by HPLC, and the space distribution and change trend of the twenty amino acids were analyzed. In addition, the removal of the twenty amino acids was also studied by different water treatment processes. The results showed that the amino acids contents and composition were different among the three reservoirs. Aspartic acid, cysteine and leucine were the main amino acids for the three reservoirs. Besides, there was no obvious seasonal variation of amino acids content for reservoir C. However, the concentration of amino acids in autumn was higher than that in summer. Coagulation and sedimentation were main units for the removal of amino acids in conventional and BAC-UF processes while O₃ oxidation was the main unit in O₃-BAC process. 94.42%, 66.04% and 49.75% of total amino acids contents were removed by the conventional, BAC-UF and O₃-BAC processes, respectively.

Key words: southern water resources; amino acids; distribution; processes; removal

随着我国工农业的快速发展, 饮用水水源普遍受到不同程度的污染, 相应地水中溶解性有机物(dissolved organic matter, DOM)含量也逐步升高。已有研究表明^[1]: 水源水中含氮有机物是净水工艺过程中消毒副产物(disinfection by-products, DBPs)的重要前体物, 近年来受到越来越广泛的关注^[2, 3]。氨基酸作为水源水中含氮有机物的重要组成部分, 广泛存在于地表水源中^[4, 5]。Chinn 等^[6]在对美国加利福尼亚原水中的氨基酸含量的调查中发现, 该水源中所检出的浓度较高的氨基酸有丝氨酸、丙氨酸、脯氨酸和甘氨酸, 其浓度在 100 nmol·L⁻¹左右。Brosillon 等^[7]对巴黎 3 个水厂的原水进行了一个水文年的检测, 结果发现不同季节各氨基酸的浓度差异很大, 其中秋季检测到的氨基酸浓度相对较高。

另一方面, 氨基酸在氯化过程中可生成 DBPs, 危害人体健康^[8~10]。国内外已有研究表明, 天冬氨酸、酪氨酸等在氯化过程中均易生成三卤甲烷(trihalomethanes, THMs)、卤乙酸(haloacetic acids, HAAs)及三氯乙醛等消毒副产物, 并且带有芳香环结构的氨基酸相对于腐殖酸, 在氯化时更易生成 THMs, 而天冬氨酸与天冬酰胺氯化后均生成较高浓度的 HAAs^[11~13]。

此外, 天然水体中的氨基酸浓度与水中生物活性(藻类)有很大关系, 且季节性变化明显^[14]。在藻

收稿日期: 2016-03-17; 修订日期: 2016-05-18

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2015ZX07406-004)

作者简介: 刘伟(1992~), 男, 硕士, 主要研究方向为饮用水消毒, E-mail: liuwei2048@126.com

* 通讯联系人, E-mail: zhangjinsong@waterchina.com

类暴发时期,水体中氨基酸检出浓度通常也较高^[15].我国南方地区常年湿热,水源存在季节性污染,藻类暴发频繁,DBPs 超标风险较高.因此,明确我国南方地区主要水源中各氨基酸浓度对水厂控制 DBPs 生成具有重要意义.本文以我国南方某市主要地表水源为研究对象,于 2015 年 5~10 月,分析了 3 个不同水库原水中各氨基酸浓度的变化趋势.同时,探讨了常规处理工艺(混凝-沉淀-过滤-消毒)、臭氧-生物活性炭(O₃-BAC)工艺、生物活性炭-超滤(BAC-UF)工艺对天然水体中各氨基酸的去除情况,以期明晰水源水中氨基酸的组成及 DBPs 的控制提供借鉴.

1 材料与方法

1.1 水样采集及预处理

水样于 2015 年 5~10 月采自我国南方某市 3 个不同的水库(A、B、C),3 水库基本信息如表 1 所示.采样时间为每月中下旬,采样频率为每月一次,水样置于事先清洗干净的聚四氟乙烯塑料桶中.由于原水中氨基酸浓度较低,需要对水样用旋转蒸发器进行浓缩处理,具体操作方法如下:将 2 L 经 0.45 μm 滤膜过滤后的水样加入旋转蒸发仪的样品

瓶中,在 40℃、100 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的条件下浓缩至 100 mL 左右,再将浓缩液用 0.22 μm 的聚碳酸酯膜过滤即得到待测水样.所有水样如不能立即测定,应放置在 4℃ 冰箱中保存,存放时间不超过 7 d.

表 1 3 水库基本信息

编号	类型	总库容/万 m^3	集雨面积/ km^2
A	中型	3 199	44
B	中型	1 424	11
C	中型	4 465	59

1.2 氨基酸检测

所需各氨基酸标准样品均购买自广州市科因生物科技有限公司(Keyinbio, Guangzhou).采用柱前在线衍生化方法,其中一级氨基酸用邻苯二甲醛(OPA)、二级氨基酸采用 9-芴甲基氯甲酸酯(FMOC)进行衍生.使用安捷伦 1260 的高效液相色谱仪(HPLC)进行检测,检测器为 FLD,色谱柱型号为 Eclipse Plus C18(150 mm $\times$ 4.6 mm $\times$ 3.5 μm),柱温为 40℃.流动相 A 为:10 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ Na₂HPO₄:10 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ Na₂B₄O₇, pH = 8.2; 5 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaN₃.流动相 B 为:甲醇:乙腈:水 = 45%:45%:10%.流动相梯度随时间变化如表 2 所示.

表 2 流动相梯度变化

时间/min	0	0.5	20	20.1	23.5	23.6	25
流动相(B)/%	2	2	57	100	100	2	End

其中,流动相流速为 1.5 $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$,FLD 检测器具体参数为:0~17 min,激发波长 340 nm,发射波长 450 nm;17 min 时更改激发波长为 266 nm,发射波长 305 nm.使用该方法测常见的 20 种氨基酸,其回收率范围为 91.6%~103.2%.

2 结果与讨论

2.1 原水中氨基酸浓度及变化趋势

2.1.1 原水中氨基酸浓度

2015 年 5~10 月 3 个不同水库中各氨基酸浓度及 3 水库基本信息如表 1 与表 3 所示.由表 3 中数据分析可知,在 5~7 月,3 水库中半胱氨酸浓度均很高,远高于其他氨基酸含量.这可能是由于这几个月份进入水库的水中含有大量半胱氨酸加上半胱氨酸本身就具有良好的水溶性(室温下,每 100 mL 水可溶解 10 g 左右)^[16]造成的.

除半胱氨酸外,A 水库的主要氨基酸组成为天

冬氨酸、谷氨酸、亮氨酸、酪氨酸、精氨酸;B 水库的主要氨基酸组成为天冬氨酸、谷氨酸、组氨酸、甘氨酸、亮氨酸;C 水库中主要氨基酸组成为天冬氨酸、谷氨酸、亮氨酸、精氨酸、蛋氨酸.从 5~10 月各水库原水中所含氨基酸总量平均值看,所研究的 3 个水库氨基酸总浓度平均值分别为 79.04、61.53、164.5 $\text{nmol}\cdot\text{L}^{-1}$.综上所述,3 个不同水库水中所含氨基酸总量基本相当,其主要组成成分也大体相当,这可能是由于该市不同水库原水水质相近造成的.姚昕等^[17]在对太湖北部高藻区溶解性氨基酸的调查研究中发现,组氨酸、精氨酸、赖氨酸、丝氨酸、酪氨酸是现存的主要氨基酸,其氨基酸总的质量浓度约为 3 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右,高于该市 3 个水库中氨基酸浓度.这可能是由于太湖富营养化严重且其研究水源为太湖藻类浓度较高的地区,水中微生物及浮游生物及其分泌物浓度较高造成的.另一方面,Yamashita 等^[18]发现,日本南部海

域西北太平洋海湾区的水溶性氨基酸浓度可达 750 nmol·L⁻¹, 远高于本文中研究的 3 个水库及太湖水域中氨基酸浓度. 这说明, 海水中氨基酸浓度高于淡水中的浓度.

表 3 3 个水库不同月份各氨基酸浓度/nmol·L⁻¹
Table 3 Concentration of amino acids in different months in the 3 different reservoirs/nmol·L⁻¹

项目	水库 A 氨基酸						水库 B 氨基酸		
	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	5 月	6 月	7 月
天冬氨酸	0.378	0.500	0.537	0.362	0.437	1.124	0.714	0.381	0
谷氨酸	0.283	0.343	0.58	0.517	0.577	0.272	0.872	0.141	0.417
天冬酰胺	0	0	0	0.017	0.035	0	0.468	0	0.525
丝氨酸	0	0	0	0	8.163	0	0.851	0	0.081
谷氨酰胺	0	0.045	0.128	0	1.47	0.541	0.275	0.062	1.634
组氨酸	0	0.017	0.063	0.56	0.722	0.124	0.303	0.020	0.730
甘氨酸	0	0	0.102	0	7.536	0	0.556	0.034	0.210
苏氨酸	0	0.021	0.038	0	0.017	1.412	0.256	0.018	0.088
精氨酸	0	0.238	0.349	0.202	0.280	1.008	0.517	0.164	0.327
丙氨酸	0	0	0.180	0	0.194	0	1.422	0	0.525
酪氨酸	0.192	0.109	0.135	0.073	0.261	0.208	0.351	0.030	0.239
半胱氨酸	70.96	61.26	321.3	7.997	4.847	1.006	17.43	206.4	69.17
缬氨酸	0	0.071	0.158	0.320	0.361	0.162	0.359	0.029	0.299
蛋氨酸	0	0.086	0.290	0	0	0.274	0.240	0.062	0.439
苯丙氨酸	0	0.072	0.086	0	0	0	0.299	0.050	0.112
异亮氨酸	0	0.127	0.326	0	0.237	0.572	0.295	0.197	0.279
亮氨酸	0.872	0.141	1.095	2.712	3.380	2.386	1.260	0.476	1.419
赖氨酸	0	0.071	0.103	0	0	0	0.558	0.052	0
脯氨酸	0	0.067	0.093	0.010	0.015	0	0.670	0.079	0.219
色氨酸	0	0	0	0	0	0	0	0	0
总量	72.69	63.17	325.6	12.77	28.532	9.089	27.70	215.2	76.71

项目	水库 B 氨基酸			水库 C 氨基酸					
	8 月	9 月	10 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月
天冬氨酸	0.373	0.648	0.755	10.82	0.533	0.334	0.275	0.518	0.530
谷氨酸	0.421	0.625	0.897	1.416	0.752	0.3236	0.555	1.146	0.293
天冬酰胺	0.019	0.083	0.441	0.279	0	0	0	0.361	0.064
丝氨酸	0	7.021	1.752	1.909	0	0	0	6.421	0.308
谷氨酰胺	0	0	0.381	0.363	0.114	0.0488	0	0.335	0.110
组氨酸	0.605	0.650	0.483	0.510	0.537	0.0996	0.515	0.248	0.090
甘氨酸	0	5.559	1.618	1.184	0.139	0	0	5.083	0.253
苏氨酸	0	0	0.458	0.475	0.089	0.0242	0	0.403	0.161
精氨酸	0.209	0.480	0.502	0.728	0.472	0.250	0.200	1.748	0.235
丙氨酸	0.156	0.164	1.791	1.731	0.418	0.231	0.144	0.163	0.161
酪氨酸	0	0.393	0.619	0.46	60.38	0.151	0	0.454	0.230
半胱氨酸	6.722	3.168	0.562	26.19	736.7	47.08	3.643	43.80	1.198
缬氨酸	0.434	0.532	1.081	0.586	1.696	0	0.297	0.770	0.143
蛋氨酸	0	0	0.288	0.515	0.863	0.153	0	0.277	0.444
苯丙氨酸	0	0	0.578	0.369	1.645	0.058	0	0.467	0.186
异亮氨酸	0.229	0.197	0.656	0.504	0.708	0.106	0.233	0.476	0.132
亮氨酸	2.396	2.699	1.437	2.762	1.036	0.325	1.957	2.519	1.251
赖氨酸	0	0	0.811	0.773	0.021	0.073	0	0.100	0.113
脯氨酸	0.002	0.028	0.609	0.426	0.077	0.118	0.011	0.613	0.063
色氨酸	0	0	0	0	0	0	0	0	0
总量	11.57	22.25	15.72	52	806.2	49.38	7.83	65.90	5.965

2.1.2 原水中氨基酸变化趋势

由于水库 C 为该市储水量较大的水库,且为该市市区范围内主要供水水源,具有代表性,因此选择水库 C 作为分析对象. 由表 3 中数据分析可知,该

水库中各氨基酸浓度并无明显季节性变化特征. 由于 6 月水库 C 中半胱氨酸与酪氨酸浓度突然升高且远高于其他氨基酸浓度之和,使得 6 月水库中氨基酸总浓度远高于其他月份. 但是,从除半胱氨酸、

酪氨酸外的其他氨基酸总量上看,5月与9月要远高于其他月份,其次是6月,8月与10月相差较小,7月浓度最低。因此,除半胱氨酸、酪氨酸外,其余氨基酸的总浓度在夏季(7、8月)均低于其他季节。这与九龙江河流水体中的溶解性氨基酸浓度变化相反,该水体夏季氨基酸浓度最高,秋季最低^[19]。另一方面,该市夏季是其高藻期间,水体中藻类浓度较高^[20]。根据 Krasner 等^[21]的研究成果,水体中氨基酸含量与藻类含量相关性较强,这与本研究成果不符。可能是由于该市7、8月降雨量大且集中,对水库水源有一定的稀释作用造成的。

2.2 不同处理工艺对氨基酸的去除

由2.1节中分析可知,该市3个主要水库水源

中均含有一定量的氨基酸,且由于氨基酸在氯消毒过程中可与消毒剂发生化学反应,较易生成危害人体健康的DBPs。为能更加有效地指导水厂对消毒过程中DBPs的控制,需进一步研究水库原水中各氨基酸在不同水处理工艺过程中浓度的变化情况。该南方城市所采用的主要水处理工艺包括常规工艺、O₃-BAC工艺、BAC-UF工艺,因此选择采用此3种工艺的水厂作为研究对象,分析不同工艺单元对氨基酸的消减情况,其中,3个水厂原水均来自水库C。

2.2.1 常规工艺对氨基酸的去除

常规工艺中氨基酸的浓度变化及去除情况如图1所示。

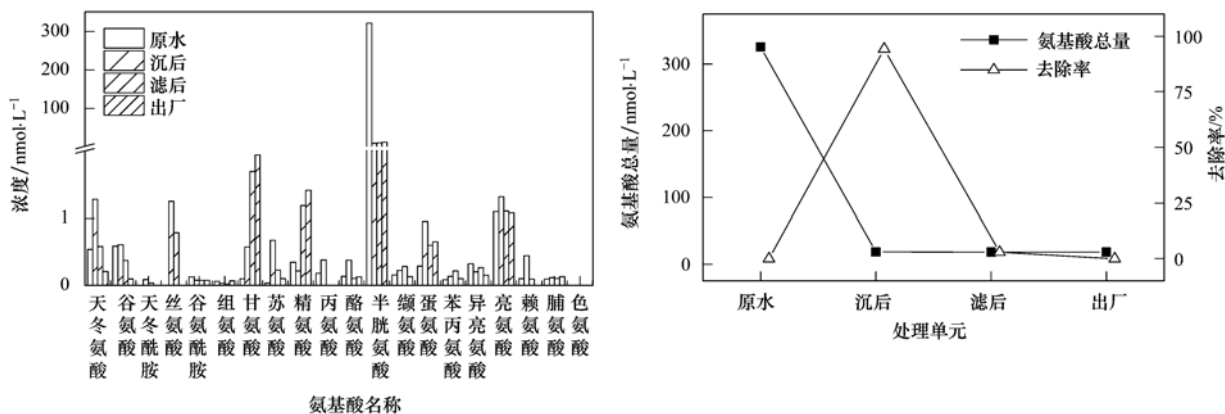


图1 常规工艺氨基酸浓度变化与去除

Fig. 1 Concentration variation and removal of amino acids in conventional process

由图1分析可知,常规工艺对氨基酸的去除效率总体较差。不同氨基酸在工艺流程中的浓度变化不同,除谷氨酰胺、组氨酸、精氨酸、半胱氨酸、异亮氨酸等5种氨基酸外,其余氨基酸浓度在混凝沉淀工艺后,均有不同程度的增加。混凝沉淀单元对原水中高浓度的半胱氨酸有很好的去除效果,去除率可达97%,而对其他低浓度的氨基酸基本无去除效果。过滤工艺对水中大多数氨基酸均有一定的去除效果。加氯消毒后部分氨基酸浓度出现不同程度的增加。这可能是由于加氯后氯与水中大分子有机物反应,将其分解为小分子的氨基酸等有机物。此外,国内外研究表明^[22~25],氯(氯胺)消毒会导致水中可同化有机碳(assimilable organic carbon, AOC)的浓度升高,且氨基酸是AOC的主要组成部分^[26],这也可能是氯化后多种氨基酸浓度升高的原因。从氨基酸总量上看,混凝沉淀单元去除率为94.26%,砂率单元去除率为2.94%,总去除率为94.42%,其中混凝沉淀单元对氨基酸有较好的去除效果。

2.2.2 BAC-UF工艺对氨基酸的去除

BAC-UF工艺氨基酸浓度变化与去除情况如图2所示。

由图2分析可知,原水中各氨基酸在工艺过程中的变化情况与常规工艺相似,除对苏氨酸、半胱氨酸、苯丙氨酸、异亮氨酸、亮氨酸等少数几种氨基酸有一定的去除效果外,出厂水中的其他氨基酸浓度均比原水高。但是,与常规工艺类似,BAC-UF工艺对高浓度的半胱氨酸有良好的去除效果,而对低浓度的其他氨基酸去除不理想。从氨基酸总量上看,混凝沉淀单元去除率为20.78%,BAC单元去除率为38.99%,UF单元去除率为14.17%,总去除率为66.04%。由此可见,在BAC-UF工艺中混凝沉淀与BAC单元对氨基酸有较好的去除作用。

2.2.3 O₃-BAC工艺对氨基酸的去除

O₃-BAC工艺氨基酸浓度变化与去除情况如图3所示。

由图3分析可知,混凝沉淀单元对氨基酸基本

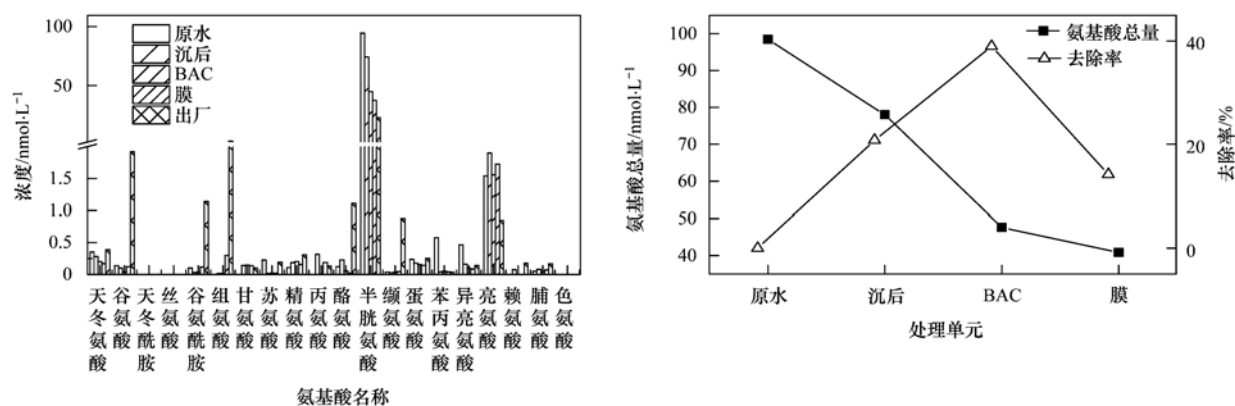
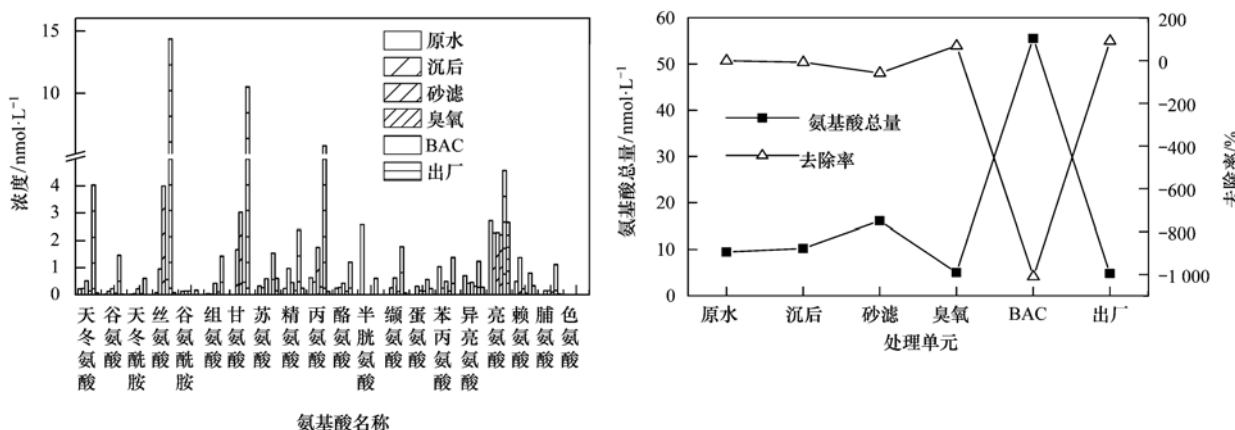


图2 BAC-UF 工艺氨基酸浓度变化与去除

Fig. 2 Concentration variation and removal of amino acids in BAC-UF process

图3 O₃-BAC 工艺氨基酸浓度变化与去除Fig. 3 Concentration variation and removal of amino acids in O₃-BAC process

无去除作用,部分氨基酸浓度增加,这可能是由于O₃预氧化的强化作用使得藻细胞破裂,胞内物质外泄,而氨基酸是藻类分泌物的主要组成部分^[27]。砂滤单元出水多数氨基酸浓度升高,这可能是由于滤料上的吸附物脱附外泄所致。主O₃单元对水中氨基酸有明显的去除效果,对大多数氨基酸的去除率可达65%以上,这可能是经过常规工艺多数颗粒物已经去除,O₃与氨基酸接触更为充分,O₃强氧化作用分解所致。BAC单元出水中各氨基酸浓度大幅升高,这可能是由于生物活性炭表面附着大量微生物,形成生物膜,臭氧氧化水经过这些生物膜时,将生物膜表面的微生物及其分泌物带出,导致水中氨基酸浓度大幅增加。出厂水中氨基酸浓度迅速下降到较低水平,这可能是由于O₃-BAC深度处理工艺中,原水中大部分有机物质在前期工艺单元中均被去除,氯化时不会产生小分子有机物,而氯可与小分子氨基酸反应,从而使得出厂水中氨基酸浓度降低。从氨基酸总量上看,混凝沉淀单元去除率为-

7.81%,砂滤单元去除率为-58.15%,主O₃单元去除率为68.91%,BAC单元去除率为-1009.36%,总去除率为49.75%。

综上所述,通过比较3种主要水处理工艺可以发现,常规工艺对高浓度的半胱氨酸去除效果良好,且混凝沉淀单元起主要的去除作用,但对低浓度的其他氨基酸基本无去除效果,加氯消毒后,出厂水中除半胱氨酸外的其他氨基酸浓度甚至出现不同程度的增加。BAC-UF工艺与常规工艺类似,主要对半胱氨酸有较好的去除效果,而对其他低浓度氨基酸去除效果较差,但略优于常规工艺。O₃-BAC工艺对大多数低浓度的氨基酸均有良好的去除效果,主要去除单元为主臭氧化。考虑到水源水中氨基酸含量普遍较低,故认为O₃-BAC工艺为去除原水中氨基酸的最佳工艺。

3 结论

(1) 3个水库原水中各氨基酸浓度组成差异较

大,但最主要的几种氨基酸为天冬氨酸、谷氨酸、半胱氨酸、亮氨酸等。此外,氨基酸总量从高到低依次为:水库 C > 水库 A > 水库 B,浓度分别为 79.04、61.53、164.5 nmol·L⁻¹。

(2)水库 C 中各氨基酸含量季节性变化并不明显。从氨基酸总量上看,6 月浓度最高,其次是 5 月与 9 月,7、8 月最低;从除半胱氨酸、酪氨酸以外的其他氨基酸总量上看,5 月与 9 月最高,7、8 月最低。

(3)常规工艺与 BAC-UF 工艺均对高浓度的半胱氨酸有良好的去除效果,而对其他低浓度氨基酸去除效果差,混凝沉淀单元为氨基酸的主要去除单元。O₃-BAC 工艺对大多数低浓度氨基酸均有良好的去除效果,主臭氧单元起主要去除作用。

(4)常规工艺、BAC-UF 工艺、O₃-BAC 工艺对氨基酸总量的去除率分别为 94.42%、66.04%、49.75%。

参考文献:

- [1] 陈忠林, 李安, 王胜军, 等. 色氨酸氯化消毒生成卤乙酸的影响因素研究[J]. 黑龙江大学自然科学学报, 2010, 27(6): 731-734.
Chen Z L, Li A, Wang S J, et al. Haloacetic acids formation from tryptophan during chlorination disinfection[J]. Journal of Natural Science of Heilongjiang University, 2010, 27(6): 731-734.
- [2] Tian C, Liu R P, Liu H J, et al. Disinfection by-products formation and precursors transformation during chlorination and chloramination of highly-polluted source water: Significance of ammonia[J]. Water Research, 2013, 47(15): 5901-5910.
- [3] Fan X J, Tao Y, Wei D Q, et al. Removal of organic matter and disinfection by-products precursors in a hybrid process combining ozonation with ceramic membrane ultrafiltration[J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2015, 9(1): 112-120.
- [4] Hureiki L, Croué J P, Legube B. Chlorination studies of free and combined amino acids[J]. Water Research, 1994, 28(12): 2521-2531.
- [5] Chu W H, Gao N Y, Krasner S W, et al. Formation of halogenated C-, N-DBPs from chlor(am)ination and UV irradiation of tyrosine in drinking water[J]. Environmental Pollution, 2012, 161: 8-14.
- [6] Chinn R, Barrett S E. Occurrence of amino acids in two drinking water sources[A]. In: Metropolitan Water District of Southern California, 700 Moreno Avenue [C]. La Verne: Metropolitan Water District of Southern California, 2000. 96-108.
- [7] Brosillon S, Lemasle M, Renault E, et al. Analysis and occurrence of odorous disinfection by-products from chlorination of amino acids in three different drinking water treatment plants and corresponding distribution networks[J]. Chemosphere, 2009, 77(8): 1035-1042.
- [8] Bond T, Templeton M R, Graham N. Precursors of nitrogenous disinfection by-products in drinking water--a critical review and analysis[J]. Journal of Hazardous Materials, 2012, 235-236: 1-16.
- [9] Nihemaiti M, Le Roux J, Croué J P. Formation of emerging disinfection by-products by chlorination/chloramination of seawater impacted by algal organic matter[A]. In: Baawain M, Choudri B S, Ahmed M, et al (Eds.). Recent Progress in Desalination, Environmental and Marine Outfall Systems. Switzerland: Springer, 2015: 285-294.
- [10] Li J, Blatchley E R. Volatile Disinfection Byproduct Formation Resulting from Chlorination of Organic - Nitrogen Precursors in Swimming Pools[J]. Environment Science Technology, 2007, 41(19): 6732-6739.
- [11] Chen Z L, Li A, Wang S J, et al. Formation of THMs during Chlorination of tyrosine in drinking water[A]. In: Proceedings of the 5th International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering[C]. Wuhan: IEEE, 2011: 1-4.
- [12] Hong H C, Wong M H, Liang Y. Amino acids as precursors of trihalomethane and haloacetic acid formation during chlorination[J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2009, 56(4): 638-645.
- [13] Trehy M L, Yost R A, Miles C J. Chlorination byproducts of amino acids in natural waters[J]. Environmental Science & Technology, 1986, 20(11): 1117-1122.
- [14] Krasner S W, McGuire M J, Jacangelo J G, et al. The occurrence of disinfection by-products in US drinking water[J]. American Water Works Association, 1989, 81(8): 41-53.
- [15] Meon B, Kirchman D L. Dynamics and molecular composition of dissolved organic material during experimental phytoplankton blooms[J]. Marine Chemistry, 2001, 75(3): 185-199.
- [16] 陈恒武, 何巧红. 氢化物原子光谱法的新增效试剂 L-半胱氨酸[J]. 分析化学, 2000, 10(3): 368-373.
Chen H W, He Q H. L-cysteine-a novel reagent for hydride generation atomic spectrometry[J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2000, 10(3): 368-373.
- [17] 姚昕, 朱广伟, 秦伯强. 太湖北部水体溶解性氨基酸分布特征及其环境意义[J]. 中国环境科学, 2010, 30(10): 1402-1407.
Yao X, Zhu G W, Qin B Q. Distribution of dissolved amino acids and its environmental significance in water of Taihu Lake, China[J]. China Environmental Science, 2010, 30(10): 1402-1407.
- [18] Yamashita Y, Tanoue E. Distribution and alteration of amino acids in bulk DOM along a transect from bay to oceanic waters[J]. Marine Chemistry, 2003, 82(3-4): 145-160.
- [19] 刘春兰. 天然胶体中氮、氨基酸和碳水化合物含量、组成及季节变化研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2006. 15-19.
Liu C L. Studies of contents, composition and seasonal variation of nitrogen, amino acid and carbohydrate in nature colloids[D]. Xiamen: Xiamen University, 2006. 15-19.
- [20] 章开, 乔铁军, 欧阳峰, 等. 深圳水源水藻类去除中试研究[J]. 给水排水, 2007, 33(2): 25-29.
Zhang K, Qiao T J, Ouyang F, et al. Pilot plant research on algae removal of raw water in Shenzhen[J]. Water & Wastewater Engineering, 2007, 33(2): 25-29.
- [21] Krasner S W, Croué J P, Buffle J, et al. Three approaches for characterizing NOM[J]. American Water Works Association, 1996, 88(6): 66-79.
- [22] Soonglerdsongpha S, Kasuga I, Kurisu F, et al. Comparison of

- assimilable organic carbon removal and bacterial community structures in biological activated carbon process for advanced drinking water treatment plants [J]. Sustainable Environment Research, 2011, **21**(1): 59-64.
- [23] 梁涛. 可生物同化有机碳在给水处理单元过程中的变化规律 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009. 24-28.
- Liang T. Variation of assimilable organic carbon in drinking water treatment processes [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009. 24-28.
- [24] Lou J C, Chen B H, Chang T W, *et al.* Variation and removal efficiency of assimilable organic carbon (AOC) in an advanced water treatment system [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2011, **178**(1-4): 73-83.
- [25] Dotson A, Westerhoff P. Occurrence and removal of amino acids during drinking water treatment [J]. American Water Works Association, 2009, **101**(9): 101-115.
- [26] 方华. 饮用水生物稳定性和净水工艺对有机物去除的研究 [D]. 南京: 东南大学, 2006. 34-37.
- Fang H. Study on biological stability of drinking water and removing organic matter by water purification processes [D]. Nanjing: Southeast University, 2006. 34-37.
- [27] 刘海龙, 杨栋, 赵智勇, 等. 高藻原水预臭氧强化混凝除藻特性研究 [J]. 环境科学, 2009, **30**(7): 1914-1919.
- Liu H L, Yang D, Zhao Z Y, *et al.* Algae removal of high algae raw water by coagulation enhanced by ozonation [J]. Environmental Science, 2009, **30**(7): 1914-1919.

CONTENTS

Scavenging Effect of Rime and East Wind on PM _{2.5} Under Air Heavy Pollution in Beijing	SUN Zhao-bin, LIAO Xiao-nong, WANG Zhan-shan, <i>et al.</i> (3679)
Impact of Collision Removal of Rainfall on Aerosol Particles of Different Sizes	DONG Qun, ZHAO Pu-sheng, CHEN Yi-na (3686)
Source Apportionment and Health Risk Assessment of VOCs During the Haze Period in the Winter in Beijing	LIU Dan, XIE Qiang, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (3693)
Pollution Characteristics and Emission Coefficient of Volatile Organic Compounds from Shoe-making Industry in Zhejiang Province	XU Zhi-rong, YAO Yi, CAI Wei-dan, <i>et al.</i> (3702)
Oxidative Capacity of the PM ₁₀ and PM _{2.5} in Beijing During 2014 APEC	GUO Qian, SHAO Long-yi, WANG Wen-hua, <i>et al.</i> (3708)
Concentration, Water-Soluble Ionic and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Composition and Sources of PM _{2.5} During Summer in Hongshan District, Wuhan	SUN Yan, QI Shi-hua, ZHANG Li, <i>et al.</i> (3714)
Statistical Characteristics of Urban Changzhou PM _{2.5} Based on <i>k</i> -means Analysis	WANG Zhen, YU Yi-jun, XU Pu-qing, <i>et al.</i> (3723)
Comparison Test Between On-line Monitoring of Water-soluble Ions and Filter-based Manual Methods for PM _{2.5}	YANG Dong-yan, LIU Bao-xian, SHI Ai-jun, <i>et al.</i> (3730)
Chemical Composition of Water-soluble Ions in Smoke Emitted from Tree Branch Combustion	LIU Gang, HUANG Ke, LI Jiu-hai, <i>et al.</i> (3737)
Number Concentration and Size Distribution of Particles Emitted by Light-duty Gasoline Vehicles	FAN Xiao-xiao, JIANG Jing-kun, ZHANG Qiang, <i>et al.</i> (3743)
Testbed-Based Exhaust Emission Factors for Marine Diesel Engines in China	XING Hui, DUAN Shu-lin, HUANG Lian-zhong, <i>et al.</i> (3750)
Distribution, Source and Human Exposure of Phthalic Acid Esters (PAEs) in Surface Dust in Urban Area of Xi'an City, China	ZHANG Wen-juan, WANG Li-jun, WANG Li, <i>et al.</i> (3758)
Mercury Emission Characteristics and Mercury Concentrations of Municipal Solid Waste in Waste Incineration Plants	DUAN Zhen-ya, SU Hai-tao, WANG Feng-yang, <i>et al.</i> (3766)
Role of Sulfate-Reducing Bacteria in Mercury Methylation in Soil of the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir Area	CHEN Rui, CHEN Hua, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (3774)
Impact of Urbanization on the Sources of Dissolved <i>n</i> -alkane in Underground River	LIAO Yu, SUN Yu-chuan, SHEN Li-cheng, <i>et al.</i> (3781)
Source Apportionment and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Water from Yangtze River, China; Based on PMF Model	WANG Cheng-long, ZOU Xin-qing, ZHAO Yi-fei, <i>et al.</i> (3789)
Hydro-chemical Characteristics and Quality Assessment of Surface Water in Gongga Mountain Region	HE Xiao-li, WU Yan-hong, ZHOU Jun, <i>et al.</i> (3798)
UV-Visible Spectra Properties of DOM from Taizi River in Benxi City Section by Multivariable Analysis	QIAN Feng, WU Jie-yun, YU Hui-bin, <i>et al.</i> (3806)
Vertical Distribution Characteristics of Dissolved Organic Matter in Groundwater and Its Cause	HE Xiao-song, ZHANG Hui, HUANG Cai-hong, <i>et al.</i> (3813)
Sediment Characteristics of Sewer in Different Functional Areas of Kunming	CHANG Hai-dong, JIN Peng-kang, FU Bo-wen, <i>et al.</i> (3821)
Concentration of Phosphorus in Sediments Interstitial Water as Affected by Distribution of Aquatic Plants in Dianchi Lake	DING Shuai, WANG Sheng-rui, ZHANG Rui, <i>et al.</i> (3828)
Efficiency and Mechanism of Capping with Purple Parent Rocks to Control Phosphorus Release from Sediments	HUANG Xue-jiao, SHI Wen-hao, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (3835)
Temporal and Spatial Distribution of Phosphorus in Paddy Fields Under Cyclic Irrigation of Drainage Water	JIAO Ping-jin, XU Di, ZHU Jian-qiang, <i>et al.</i> (3842)
GO/QPEI Nanocomposite for Fast and High-capacity Removal of <i>M. Aeruginosa</i>	LI Jie, XIAO Lin (3850)
Enhanced Pollutant Removal Performance of an Integrated Biological Settling Tank from Micro-polluted Water Bodies	WANG Wen-dong, LIU Hui, MA Cui, <i>et al.</i> (3858)
Odorants Removal and Microbial Characteristics in Treatment of Micro-polluted Source Water with Biological Powdered Activated Carbon-Ultrafiltration Combined Process	XUAN Yong-qi, ZHOU Li, DENG Hui-ping, <i>et al.</i> (3864)
Effect of Polysilicic Acid on the Deposition Behavior of Different Aluminum Species	ZHAO Yuan-yuan, ZHANG Yue, LI Su-ying, <i>et al.</i> (3870)
Concentration Variation and Removal of Amino Acids in Typical Drinking Sources in the South of China	LIU Wei, CAI Guang-qiang, LU Xiao-yan, <i>et al.</i> (3877)
Degradation of the Nitrogenous Heterocyclic Compound Quinoline by O ₃ /UV	CHEN Ao-lei, CHANG Feng-min, WANG Cui-ping, <i>et al.</i> (3884)
Impact of Anthraquinone-2-sulfonic Acid on the MO Decolorization, Hydrogen Production and Energy Creation During Anaerobic Fermentation of <i>Klebsiella oxytoca</i> GS-4-08 with Sucrose	HU Jin-mei, YU Lei, HUANG Tian-yin (3891)
Classification and Analysis of Dissolved Organic Matter in 2-Buternal Manufacture Wastewater	SUN Xiu-mei, SONG Guang-qing, XI Hong-bo, <i>et al.</i> (3899)
Concentration of Nitrate in Main Anoxic Stage and PHA, TP Metabolism for Nitrogen and Phosphorus Removal in Single Sludge System with Continuous Flow	WANG Xiao-ling, YUAN Dong-dan, BAI Li, <i>et al.</i> (3906)
Distribution Characteristics of Anaerobic Ammonia Oxidation Bacteria in Sediments from the Adjacent Seas of Yangtze Estuary	FU Lu-lu, ZHEN Yu, HE Hui, <i>et al.</i> (3914)
Bacterial Community Composition of Activated Sludge from Coking Wastewater	MENG Xiao-jun, LI Hai-bo, CAO Hong-bin, <i>et al.</i> (3923)
Soil Bacterial Communities Under Different Vegetation Types in the Loess Plateau	LIU Yang, HUANG Yi-mei, ZENG Quan-chao (3931)
Effects of Phenol on Activity and Microfauna Community Structure of Activated Sludge	HU Xiao-bing, RAO Qiang, TANG Su-lan, <i>et al.</i> (3939)
Comparative Investigation of Antibiotic Resistance Genes Between Wastewater and Landfill Leachate	HUANG Fu-yi, LI Hu, AN Xin-li, <i>et al.</i> (3949)
Performance and Influencing Factors of Dissimilatory Nitrate Reduction to Ammonium Process by the Strain <i>Desulfonitrospira</i> sp. CMX	XIE Bing-ke, ZHANG Yu, WANG Xiao-wei, <i>et al.</i> (3955)
Effect of Straw Incorporation and Domestic Sewage Irrigation on Ammonia Volatilization from Paddy Fields	XU Shan-shan, HOU Peng-fu, FAN Li-hui, <i>et al.</i> (3963)
Seasonal Effect of Simulated Nitrogen Deposition on Soil Respiration and Soil Enzyme Activity in Masson Pine Forest in Mt. Jinyun, Chongqing, China	ZENG Qing-ping, HE Bing-hui, LI Yuan, <i>et al.</i> (3971)
Effects of Biochar Amendment and Irrigation on Denitrification Losses in Greenhouse Tomato Fields	ZHANG Wen-juan, SHE Dong-li, Gamareldawla H. D. Aghna, <i>et al.</i> (3979)
Effects of Soil Texture on Autotrophic CO ₂ Fixation Bacterial Communities and Their CO ₂ Assimilation Contents	WANG Qun-yan, WU Xiao-hong, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i> (3987)
Simulation of the Absorption, Migration and Accumulation Process of Heavy Metal Elements in Soil-crop System	SHI Ya-xing, WU Shao-hua, ZHOU Sheng-lu, <i>et al.</i> (3996)
Synergetic Control of Bioavailability of Pb, Cd and As in the Rice Paddy System by Combined Amendments	WANG Ying-jie, ZOU Jia-ling, YANG Wen-tao, <i>et al.</i> (4004)
Effects of Different Organic Materials on Bio-availability of Cd, Pb in a Contaminated Greenhouse Soil	ZHOU Gui-yu, JIANG Hui-min, YANG Jun-cheng, <i>et al.</i> (4011)
Effect of Montmorillonite on Fractions and Availability of Phosphorus in Soils Applied with Organic Fertilizer	SONG Xian-wei, ZHAO Xiu-lan, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (4020)
Effect of Nano Zeolite on Chemical Fractions of Cd in Soil and Uptake by Chinese Cabbage at Different Soil pH and Cadmium Levels	QIN Yu-li, XIONG Shi-juan, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (4030)
Characterization of Cr Tolerance and Accumulation in <i>Lolium perenne</i> L. and <i>Pharbitis purpurea</i> (L.) Voigt	DONG Bing-bing, CHEN You-yuan, HUI Hong-xia, <i>et al.</i> (4044)
<i>In vitro</i> Metabolism of Volatile Methyl Siloxanes	LI Min-dan, ZHENG Guo-mao, WAN Yi, <i>et al.</i> (4054)
Efficiency of Aerobic Co-composting of Urban Sludge and Chinese Medicinal Herbal Residues	SU Cheng-yuan, ZHENG Peng, RUAN Qi-hua, <i>et al.</i> (4062)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
赵进才 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年10月15日 第37卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 10 Oct. 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易集团有限公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行