

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第10期

Vol.36 No.10

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

基于细颗粒物来源追踪技术的2013年12月上海市严重污染过程中PM _{2.5} 的源贡献分析·····	李莉, 安静宇, 严茹莎 (3543)
华北地区乡村站点(曲周)夏季PM _{2.5} 中二次无机组分的生成机制与来源解析·····	陈仕意, 曾立民, 董华斌, 朱彤 (3554)
成都市大气PM _{2.5} 中有机磷阻燃剂的污染水平及来源·····	印红玲, 李世平, 叶芝祥, 杨迎春, 梁金凤, 游俊杰 (3566)
不同生物质燃烧排放多环芳烃及糖醇类化合物的模拟研究·····	黄帅, 黄欣怡, 吴水平, 胡清华, 陈晓秋 (3573)
北京地区大气消光特征及参数化研究·····	陈一娜, 赵普生, 何迪, 董璠, 赵秀娟, 张小玲 (3582)
光助芬顿反应催化降解气体中甲苯·····	郑思灿, 陈天虎, 刘海波, 邹雪华, 朱承驻, 陈冬 (3590)
遗体火化二噁英类排放水平及影响因素·····	尹文华, 于晓巍, 韩静磊, 冯桂贤, 付建平, 杨艳艳, 鞠勇明, 张素坤 (3596)
我国餐厨废物生化处理设施恶臭排放特征分析·····	张妍, 王元刚, 卢志强, 韩萌, 商彬彬, 曹阳, 张君 (3603)
太湖湖表反照率时空特征及影响因子·····	曹畅, 李旭辉, 张弥, 刘寿东, 肖薇, 肖启涛, 徐家平 (3611)
基于GOCI影像的太湖水体漫衰减系数遥感反演·····	王珊珊, 李云梅, 王桥, 吕恒 (3620)
河口盐度梯度下短叶茳苳沼泽湿地土壤间隙水溶解性甲烷时空特征·····	杨平, 张子川, 杜威宁, 黄佳芳, 全川 (3633)
石家庄市土壤水分运移的稳定同位素特征分析·····	陈同同, 陈辉, 韩璐, 邢星, 付阳阳 (3641)
长寿湖水库垂直剖面不同形态汞的季节变化特征及其影响因素·····	白薇扬, 张成, 唐振亚, 赵铮, 王定勇 (3649)
三峡库区消落带4种典型植物根际土壤养分与氮素赋存形态·····	王晓峰, 袁兴中, 刘红, 张磊, 尉建军, 岳俊生 (3662)
湖泊水-沉积物界面DIC和DOC交换通量及耦合关系·····	王伟颖, 吕昌伟, 何江, 左乐, 颜道浩 (3674)
水体扰动条件下物质在沉积介质中的迁移·····	李邵龙, 陈道毅 (3683)
城市道路径流的排污特征·····	武俊良, 任玉芬, 王雪梅, 王效科, 陈利顶, 刘刚才 (3691)
杭州市余杭区典型农村暴雨径流污染特征·····	段圣辉, 赵钰, 单保庆, 唐文忠, 张文强, 张淑珍, 郎超 (3697)
海水淡化超滤-反渗透工艺沿程溴代消毒副产物变化规律·····	杨哲, 孙迎雪, 石娜, 胡洪管 (3706)
天然有机物和电解质对水中C ₆₀ 凝聚行为的影响·····	方华, 荆洁, 于江华, 王钰葶 (3715)
铅改性高岭土原位改良技术控制重污染河道底泥磷释放效果·····	王虹, 林建伟, 詹艳慧, 章喆, 王笛入 (3720)
污水管网中无机氮类营养盐变迁规律·····	金鹏康, 焦丁, 任武昂 (3730)
微好氧水解酸化在石化废水预处理中的应用研究·····	朱晨, 吴昌永, 周岳溪, 伏小勇, 陈学民, 邱延波, 吴晓峰 (3738)
倒置A ² /O-MBR组合工艺处理生活污水效能及膜污染特性·····	王旭东, 马亚斌, 王磊, 杨怡婷, 黄丹曦, 夏四清 (3743)
高氨氮对具有回流的PN-ANAMMOX串联工艺的脱氮影响·····	李祥, 崔剑虹, 袁砚, 黄勇, 袁怡, 刘忻 (3749)
苯甲酸盐厌氧驯化体系中三氯乙烯的还原脱氯特性·····	李姜维, 杨晓永, 胡安谊, 于昌平 (3756)
驯化污泥厌氧还原脱氯促进2,4,6-三氯酚矿化及胞外呼吸脱氯途径·····	宋佳秀, 李玲, 盛凡凡, 郭翠香, 张永明, 李祖元, 王天丽 (3764)
苯酚对厌氧氨氧化污泥脱氮效能长短期影响·····	杨朋兵, 李祥, 黄勇, 朱亮, 崔剑虹, 徐彬彬 (3771)
连续流好氧颗粒污泥系统处理低COD/N实际生活污水的工艺优化·····	鲁磊, 信欣, 鲁航, 朱辽东, 谢思建, 武勇 (3778)
FNA对好氧吸磷的长期抑制及污泥吸磷方式转化·····	马娟, 李璐, 俞小军, 孙雷军, 孙洪伟, 陈永志 (3786)
污水处理厂不同工艺的污泥脱水效能分析及其影响因素研究·····	刘吉宝, 李亚明, 吕鑑, 魏源送, 杨敏, 郁达伟 (3794)
残留过氧化氢对微波-过氧化氢-碱预处理后污泥水解酸化的影响·····	贾瑞来, 刘吉宝, 魏源送, 才兴 (3801)
大围山典型森林土壤有机氮垂直分布特征·····	丁咸庆, 马慧静, 朱晓龙, 陈珊, 侯红波, 彭佩钦 (3809)
缙云山不同土地利用方式对土壤活性有机碳、氮组分的影响·····	祁心, 江长胜, 郝庆菊, 李鉴霖 (3816)
三峡库区典型退耕还林模式土壤养分流失控制·····	吴东, 黄志霖, 肖文发, 曾立雄 (3825)
坡位与土层对喀斯特原生林土壤微生物生物量与丰度的影响·····	冯书珍, 苏以荣, 张伟, 陈香碧, 何寻阳 (3832)
不同种植方式对亚热带红壤微生物多样性的影响·····	沈冰洁, 祝贞科, 袁红朝, 葛体达, 王久荣, 陈明利, 吴晓英, 吴金水 (3839)
有色冶金区土壤-玉米系统汞累积及健康风险·····	纪小凤, 郑娜, 王洋, 刘强, 张静静 (3845)
改良剂对4种木本植物的铅锌耐性、亚细胞分布和化学形态的影响·····	陈永华, 张富运, 吴晓英, 梁希, 袁斯文 (3852)
菹草乙酸酯组分抑菌活性物质的分离纯化和鉴定·····	孙颖颖, 苏振霞, 浦寅芳, 肖辉, 王长海 (3860)
血吸虫病疫区水生生物体内氯苯化合物的污染特征与潜在风险·····	李昆, 赵高峰, 周怀东, 赵健, 张盼伟, 刘巧娜, 王兴勋, 刘晓茹 (3866)
生物传感细胞ADP1_pWHLux在水环境急性毒性检测中的应用·····	唐慧, 宋一之, 姜博, 陈光玉, 贾建丽, 张旭, 李广贺 (3872)
虹鳟鱼鳃及肝脏多种CYP1基因表达模式作为生物标志物监测海河水污染状况·····	高锴, 闫佩, 檀翠玲, 罗彦鹤, 孙静, Maria E. Jönsson, Ingvar Brandt, 唐运平 (3878)
纳米氧化锌对斑马鱼肝脏的毒性效应·····	刘林, 赵群芬, 金凯星, 朱帅旗, 王小飞, 吕佳昀 (3884)
黄连根茎浸提物对隆线蚤的急性毒性作用·····	陈亚楠, 袁玲 (3892)
发酵稻壳对亚铁离子和硫离子的吸附-解吸附特性·····	谢晓梅, 廖敏, 华嘉媛, 陈娜, 张楠, 徐培智, 解开治, 徐昌旭, 刘光荣 (3896)
搅拌棒吸附萃取-气相色谱-质谱联用测定海水中邻苯二甲酸酯·····	高晨晨, 李锋民, 卢伦, 孙玥 (3906)
COD组分分析的实验条件及结果可靠性分析·····	李志华, 张银, 韩杏, 余科, 李汝佳 (3913)
养猪废水和污泥中11种兽用抗生素的同时分析技术及其在生物降解过程的应用·····	丁佳丽, 刘锐, 郑炜, 余卫娟, 叶朝霞, 陈吕军, 张永明 (3918)
土壤微生物产电技术及其潜在应用研究进展·····	邓欢, 薛洪婧, 姜允斌, 钟文辉 (3926)
《环境科学》征订启事 (3553)	
《环境科学》征稿简则 (3589)	
信息 (3705, 3755, 3763, 3800)	

污水管网中无机氮类营养盐迁变规律

金鹏康, 焦丁, 任武昂

(西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710055)

摘要: 以一套长1 200 m的城市污水模拟管网为对象, 采用人工配水方式, 研究了管网中含氮化合物的变化情况, 分析评价了沿程氮类营养盐的迁变转化特性。结果表明, 以氯化铵为氮源基质, 管网微生物将其同化合成生命所需的物质以进行细胞增殖。游离氨基酸、结合氨基酸、核酸是代谢产生的主要含氮有机化合物, 其中氨基酸占溶解性有机氮(DON)的绝大多数。同时利用三维荧光光谱、尺寸排阻色谱技术对水中有机物的荧光特性及相对分子质量分布的表征结果显示, 污水中有机物的特征荧光峰有所增多, 主要以类蛋白、类微生物代谢产物为主, 且荧光强度随管网沿程逐渐增强; 水中的小分子营养盐在微生物的同化作用下转化为复杂的大分子有机物。

关键词: 污水管网; 溶解性有机氮(DON); 迁移转化; 氨基酸; 荧光特性

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)10-3730-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.10.022

Transformation of Nitrogen Nutrients in the Urban Sewage Pipe Network

JIN Peng-kang, JIAO Ding, REN Wu-ang

(School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: The paper focuses on the changes of nitrogen compounds in the Pipe network. A 1.2km long urban sewage simulation network with artificial water distribution was selected as the research subject. Then we analyzed and evaluated the change characteristics of nitrogen nutrients along the pipe. The results proved that ammonium chloride as the nitrogen source matrix, which was necessary for microorganisms in the Pipe to survive and proliferate. Free amino acids, combined amino acids and nucleic acid produced by metabolism were the major nitrogenous organic compounds. Among which, amino acids accounted for dissolved organic nitrogen (DON) in the majority. The characterization results of three-dimensional fluorescence spectroscopy and size exclusion chromatography showed that the characteristic fluorescence peak of organic matter in waste water was increased, and the protein (tyrosine, tryptophan)-based fluorescence intensity gradually increased along the pipe. It was also found that small molecules of nutrients in the water were converted to complex organic molecules under the assimilation of microorganisms.

Key words: wastewater pipe network; dissolved organic nitrogen (DON); transformation; amino acids; characteristic fluorescence

城市污水管网作为城市污水处理设施的重要组成部分,其目的主要是实现污水向处理设施的有效收集与输送。目前,污水管网同时扮演“生化反应器”的角色正逐步得到人们的认可^[1]。研究表明,污水在向污水处理厂输送过程中,管网中发生的物理、化学及微生物作用对水中COD、BOD、氮磷等污染物含量的去除具有巨大的潜能^[2-6]。例如,Chen等^[7-9]对一条长1.5 km的污水管段进行水质监测,结果表明污水中DOC的去除率达到14%,其中水相、沉积相分别贡献40%与60%。Raunkjær等^[3]通过对一段长5km的重力流管段进行研究,发现当水温在8℃时污水中COD的去除率达到42.4 mg·(L·h)⁻¹。

研究表明,生活污水中氮的存在形式主要以有机氮和氨氮为主,其含量分别约占总氮的60%、40%,微量的硝态氮和亚硝态氮含量一般不超过1%^[10]。作为污水相中无机氮的主要组成,氨氮在充当无机营养物质的同时也是造成水体富营养化的

重要原因。近年来,生物脱氮技术以其经济有效性在污水脱氮方面得到普遍关注。随着人们对新型生物技术的掌握,新型生物脱氮技术如厌氧氨氧化(ANAMMOX)、短程硝化反硝化(SHARON)以及同步硝化反硝化(SND)^[11-13]等工艺在工程实践中也得到了应用与发展,并取得了显著的脱氮效果。由于微生物在进行脱氮过程中将不可避免地同化水中的部分氨氮进行合成代谢,目前有关氨氮的研究主要集中在脱氮效果上,对于氨氮在污水中的迁变转化过程鲜有报道。此外,污水管网内表面附着有大量的微生物群体^[14,15],这些生物群落一定程度上会影响到污水中氮类化合物的组成。而针对管网中无机氮的迁变机制研究至今更是少之又少。

收稿日期: 2015-03-20; 修订日期: 2015-05-12

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07313001); 新世纪优秀人才项目(NCET-12-1043); 陕西省创新团队项目(IRT 2013KCT-13)

作者简介: 金鹏康(1974~),男,博士,教授,主要研究方向为水与废水的深度处理技术, E-mail: pkjin@hotmail.com

基于此,本研究以氯化铵作为氮源基质模拟城市生活污水,借助模拟污水管段对污水中氮氮的迁移转化机制及典型 DON 化合物(游离态氨基酸、结合态氨基酸、核酸等)进行了深入探讨,同时对污水中溶解性有机物的荧光特性及相对分子质量分布进行了分析评价。

1 材料与方法

1.1 实验装置及运行条件

城市污水管段模拟反应装置如图 1 所示. 装置主体由内部经适当打磨的 PVC 管构成,其管径 25 mm、有效长度1 200 m、坡度为 5‰. 模拟管段共设 35 层,层与层之间以检查井连接. 每层模拟管段上均设有取样点,取样点两侧通过 500 mm 长的有机玻璃管段连接,同时每节有机玻璃管段内均放置经适当打磨有机玻璃试样片从而作为管道生物膜附着载体,模拟管段外部裹有保温材料,使其处于一个避光恒温的环境中. 系统依靠潜水泵将进水箱的水提升至 2 号水箱,同时 2 号水箱的底部开有直径为 25 mm 的出水口,以满足污水在管网中依靠重力的自由流动. 反应器调节水力停留时间为 120 min,流速约为 $0.16\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,充满度 0.6.

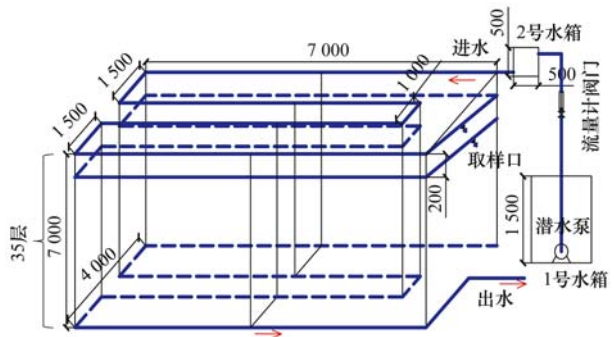


图 1 城市污水管网模拟实验装置示意
Fig. 1 Simulated urban sewer network system

1.2 配水水质

实验采用人工模拟生活污水作为原水,组成如表 1 所示^[16],原水水质见表 2.

表 1 人工模拟城市污水的组成
Table 1 Components of synthetic wastewater

组成	$c/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	组成	$c/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
葡萄糖	200	$\text{FeSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$	2
NH_4Cl	180	无水 CaCl_2	3
$\text{Na}_2\text{HPO}_4\cdot 12\text{H}_2\text{O}$	25	NaHCO_3	130
$\text{NaH}_2\text{PO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$	25	$\text{MgSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$	50
KHCO_3	50	$\text{MnSO}_4\cdot \text{H}_2\text{O}$	2

表 2 配水水质

Table 2 Synthetic wastewater quality

指标	COD $/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	NH_4^+-N $/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	TN $/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	TP $/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	DO $/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	pH
数值	300 ± 25	47 ± 2	48 ± 1	8.0 ± 0.5	0.3 ± 0.05	7.0 ± 0.5

1.3 取样及测定方法

反应器共选择 9 个取样口,取样口对应的距离分别为 0、150、300、450、600、750、900、1 050、1 200 m. 样品测定前经过 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 醋酸纤维滤膜过滤,对过滤后的水样中各含氮化合物进行测定. 具体测定方法如下所述.

1.3.1 氨基酸的测定

(1) 游离态氨基酸的测定

游离氨基酸的测定优化了马晓丽等^[17]提出的异硫氰酸苯酯(PITC)柱前衍生高效液相色谱法. 色谱装置采用 LC-10A 型高效液相色谱仪;色谱柱为 Hypersil BDS C18(250 mm×4.5 mm, 5 μm);流动相 A 为 $50\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的乙酸钠溶液,流动相 B 为体积比 30:50:20 的甲醇:乙腈:水溶液;线性梯度洗脱程序: 0 min,0% B; 6.5 min,0% B; 7 min,10% B; 8 min,12% B; 9 min,13% B; 10 min,13% B; 14 min,14% B; 15 min,15% B; 20 min,20% B; 24 min,35% B; 25 min,36% B; 27 min,36% B; 28 min,40% B; 30 min,45% B; 35 min,60% B; 35 min, 60% B; 50 min, 100% B. 流速: $1.0\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$;柱温: 40°C ;检测波长: 254 nm;进样量: $5\text{ }\mu\text{L}$. 氨基酸的标准色谱如图 2 所示.

(2) 总氨基酸的测定

取 2 mL 过滤后的水样于 10 mL 测试管中,加入 0.1 mL 的 0.1% 苯酚,加入 6 mL 的 $6\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 盐酸水解液. 混合液通入氮气吹脱 5 min,真空下封瓶. 样品在 105°C 水解 24 h,冷却后,打开安瓿瓶,烘箱下 50°C 烘干,然后用 $1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的盐酸溶解并定容至 25 mL. 采用异硫氰酸苯酯(PITC)柱前衍生高效液相色谱法测定样品中 DFAA 值,即为 DTAA 含量^[18,19]. DTAA 和 DFAA 含量差值即为 DCAA 含量.

1.3.2 微生物分析方法

生物膜固定:将取下的微生物载体放入盛有多聚甲醛(4%)的玻璃培养皿中,确保生物膜全部浸泡其中,静置 6 h 以上进行固定. 生物膜洗脱:将固定好的生物膜分别用 30%、50%、70%、80%、90%、100% 梯度浓度的酒精溶液进行洗脱,同时每个梯度中静置 15 min;脱水完毕后,再将脱水后的生物膜

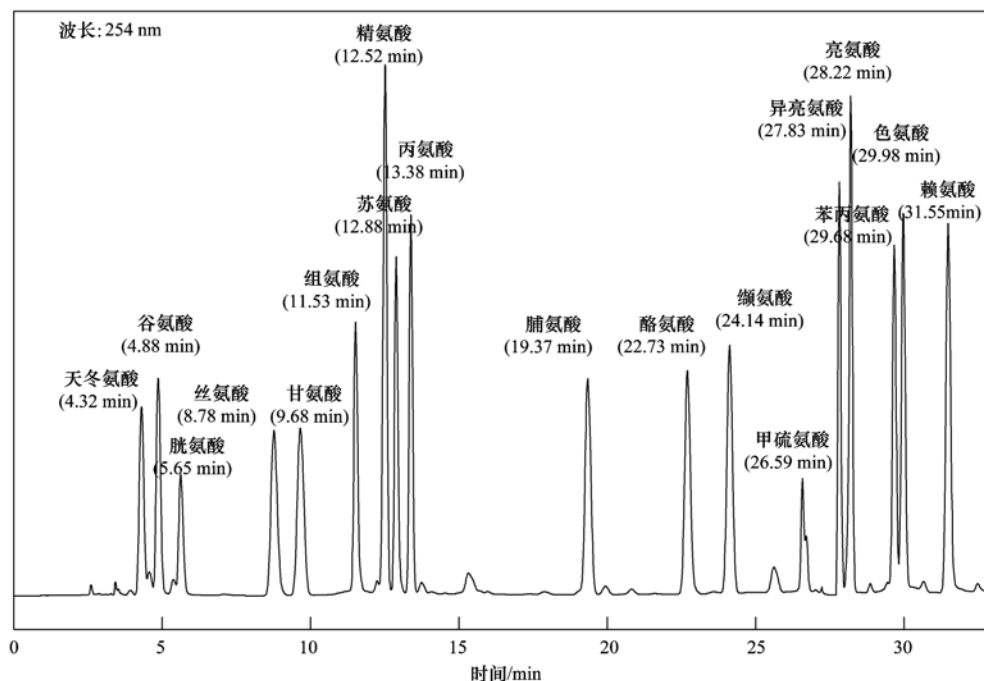


图2 氨基酸标准液相色谱图

Fig. 2 Chromatogram of the amino acids standards

置于体积比 1:1 的酒精: 乙酸异戊酯溶液中置换 5 min, 然后再用纯的乙酸异戊酯的溶液对其置换 5 min; 最后将置换好的生物膜去掉上清液, 转移到干净培养皿中在通风橱中风干. 将风干的生物膜采用扫描电子显微镜(型号: JSM-6510LV)进行观察.

1.3.3 三维荧光分析

实验采用日本 JASCO 公司生产的 FP6500 型荧光分光光度计, 对处理后的水样进行分析. 其中, 激发和发射激发的发射狭缝为 5 nm, 扫描速度为 2 000 nm·min⁻¹, 激发波长范围 220 ~ 480 nm, 扫描间隔 5 nm, 发射波长范围 280 ~ 570 nm, 扫描间隔 2 nm, 利用 Mili-Q 超纯水的扫描结果对于测定结果进行荧光光谱的拉曼散射校正.

1.3.4 相对分子质量的测定

相对分子质量的测定采用岛津公司生产的 LC-2010AHF 高效液相色谱, 色谱柱 (Zenix SEC-100 7.8 × 300 mm 3 μm), 采用紫外检测器 (检测波长 254 nm), 流动相为磷酸盐缓冲溶液, pH 等于 7.0, 进样量 20 μL, 流速控制在 0.8 mL·min⁻¹. 标准物质为聚苯乙烯磺酸钠盐.

1.3.5 其他水质指标测定

蛋白质的测定以牛血清蛋白为标准物, 采用 Folin-酚试剂法进行测定^[20]; DNA 的测定以小牛胸腺 DNA 为标准物质, 采用二苯胺比色法进行测

定^[21]; 总氮 (TN)、氨氮 (NH₄⁺-N)、亚硝酸盐氮 (NO₂⁻-N)、硝酸盐氮 (NO₃⁻-N) 均采用国标法测定; 采用称重法生物膜的微生物量^[22]; 有机氮 (Org-N) 含量以总氮与氨氮、亚硝酸盐氮、硝酸盐氮之和的差值表示.

2 结果与讨论

2.1 污水管网中生物膜生长特性

污水在管网沿程流动过程中, 水中适宜的底物将使大量微生物增殖, Jiang 等^[23]对管网中微生物生长的研究表明, 管壁生物膜厚度在经历近一个月时间的培养后达到最大值并趋于不变, 由此推断生物膜系统基本成熟. 反应器连续运行 45 d, 利用扫描电镜对管网沿程中的生物膜结构进行分析.

沿程 300、900、1 200 m 处各生物膜扫描电镜结果如图 3 所示, 从放大 2 000 倍的扫描电镜图可以清晰地显现出大量细菌附着在生物膜分泌到表面的胞外聚合物 (EPS) 上生长, 致密的菌群层主要以杆菌、丝状菌及球菌为主. 此外, 不同管段处生物膜表面都存在如孔洞或沟渠的结构, 这些孔洞被认为是底物与营养物质的传递通道, 污水在这些空隙流动的过程中形成对流, 从而增大了局部传质系数^[24]. 而粗糙的生物膜结构同时又增大了生物膜的比表面积, 这样深层的生物膜不仅可以依靠扩散作用得到

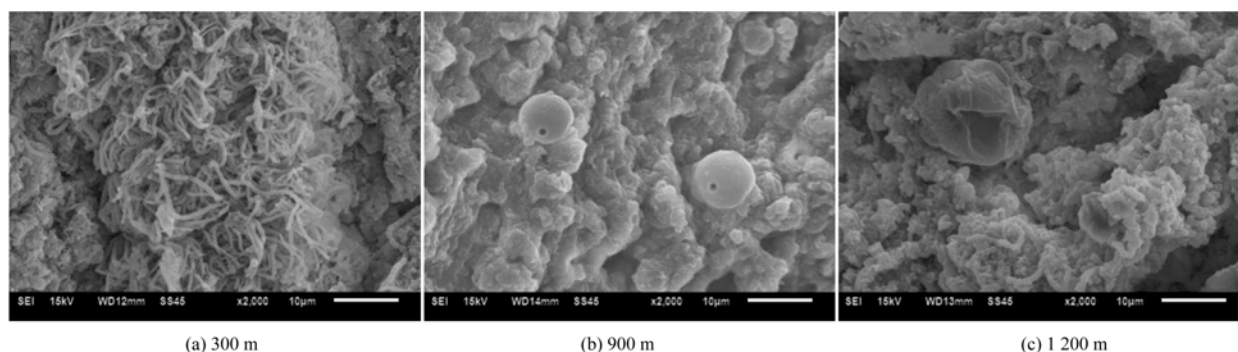


图3 生物膜结构沿程变化

Fig. 3 Variation of biofilm structure along the length of simulated networks

基质还可从液相直接获得营养. 总体而言, 这种结构有利于生物膜的生长发育, 从而能够有效去除水中的污染物质.

2.2 污水管网中氮类营养盐迁移转化特性

实验进水中溶解态总氮(DTN)、 NH_4^+ -N的平均浓度均维持在 $48 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右. 对实验水箱进行定期清洗以降低微生物作用对进水中氮类化合物的含量造成误差. 经过对管网沿程中的无机氮类化合物进行监测. 数据结果显示, NO_2^- -N在沿程中的含量均为零; NO_3^- -N随管网沿程含量均小于 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 这可能与管网中相对厌氧的环境有关. 由此表明, 污水中的无机氮主要以 NH_4^+ -N为主. 具体变化如图4所示, 污水中DTN的浓度随管网的沿程流动维持在 $48 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右基本无变化; NH_4^+ -N由初始平均浓度的 $48.62 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降低为 $43.06 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; DON含量由最初的 $0.12 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 增加到 $4.23 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 而 NO_3^- -N的含量由最初浓度的 $0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 增加到 $0.15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 由于体系中原本没有DON的存在, 而污水中DON的含量随管网沿程的增加呈现上升的趋势, 其原因在于氮源作为微生物正常增长代谢的必须营养元素之一, 在以氨氮作为系统中微生物增长的唯一氮源时, 为了保证微生物

的生长, 维持生命活动的正常进行, 微生物利用系统中的氨氮与有机物合成细胞物质, 以保证活性微生物的增长, 同时被微生物代谢氨氮而合成的有机氮又通过细胞裂解、扩散等方式以溶解性微生物产物(SMP)的形式释放到周围水体中.

污水中的DON成分较为复杂, 主要由氨基酸(AA)、核酸(DNA)、氨基糖、有机胺及一些杂环含氮化合物等组成. 采用高效液相色谱等手段进一步对污水沿程中DON各组分的含量以及生物膜的含量进行测定, 结果如图5所示, 污水随着管网的沿程流动, 水中溶解性有机氮的种类及含量均有所增加, 大致主要由游离态氨基酸、结合态氨基酸、核酸及其他一些复杂的含氮化合物(氨基糖等)组成, 三者的平均浓度分别占到DON组分的73.33%、8.56%及18.19%. 数据结果表明, 污水中合成的DON绝大多数是以氨基酸形式存在的. 此外, 分析管网沿程中生物膜含量变化可以发现, 其生物膜生物量的变化与氨基酸的变化趋势基本一致. 由于管壁生物膜主要由微生物、胞外聚合物(EPS)以及无机物组成, 而EPS中的主要成分为蛋白质、多糖, 表明管网中微生物在生长过程中的所分泌代谢产物可能是氨基酸的主要来源.

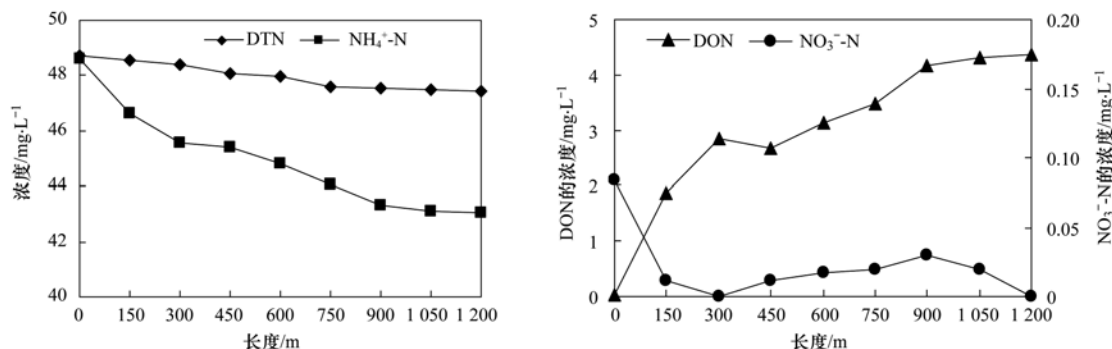


图4 含氮化合物的沿程变化

Fig. 4 Variation of the nitrogen-containing compounds along the length of simulated networks

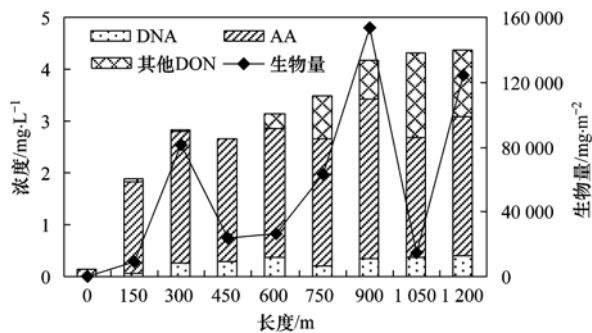


图 5 溶解性有机氮各组分沿程变化

Fig. 5 Each component of dissolved organic nitrogen changes along sewer pipe

采用保留时间法对水样中的游离氨基酸进行定量,即在色谱分析条件相同的情况下,水样中氨基酸的色谱峰与氨基酸标准的色谱峰保留时间相同或相近,则认为样品中含有此类氨基酸.图6显示了出水游离态氨基酸中各组分的色谱图,从图中看出,出水游离态氨基酸的保留时间与标准曲线(图2)的保留时间基本一致且得到完全、有效的分离.图7所示为出水氨基酸的组成及各组分所占的含量.由此分析可知,出水中氨基酸的含量为 $2.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,而检测出的游离态氨基酸(FAA)和结合态氨基酸(CAA)的含量分别为 $0.58\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $1.62\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,分别占氨基酸总量的26.7%和73.3%.说明结合态氨基酸是出水中氨基酸的主要组成部分.而在所检测到的游离氨基酸中主要以Ser(丝氨酸)、Arg(精氨酸)和Ile(异亮氨酸)的含量为最高,其含量分别为 0.11 、 0.12 和 $0.12\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,分别占氨基酸总量的17.8%、21.02%和19.49%.其次为Gly(甘氨酸)、Thr(色氨酸)、Ala(丙氨酸)、Pro(脯氨酸)

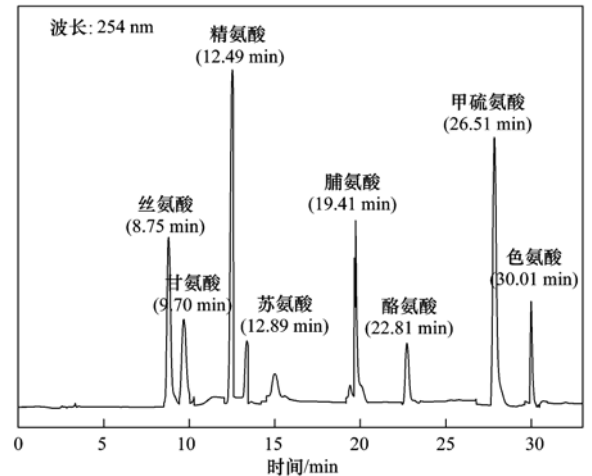


图 6 出水游离态氨基酸色谱图

Fig. 6 Chromatogram of DFAA in effluent

及Tyr(酪氨酸),分别占氨基酸总量的1.17%、4.92%、8.66%、12.57%及14.26%.此外,由于蛋白质是微生物体内细胞的重要组成部分(一般蛋白质的含氮量常表示以有机氮量的6.25倍表示),因此从图7中看出结合态氨基酸主要以蛋白质为主,其含量占结合态氨基酸的48%.剩余52%的结合态氨基酸主要以较为复杂的胺类以及多肽等组成,由于当前分析手段有限,其各自含量还有待于进一步的分析研究.

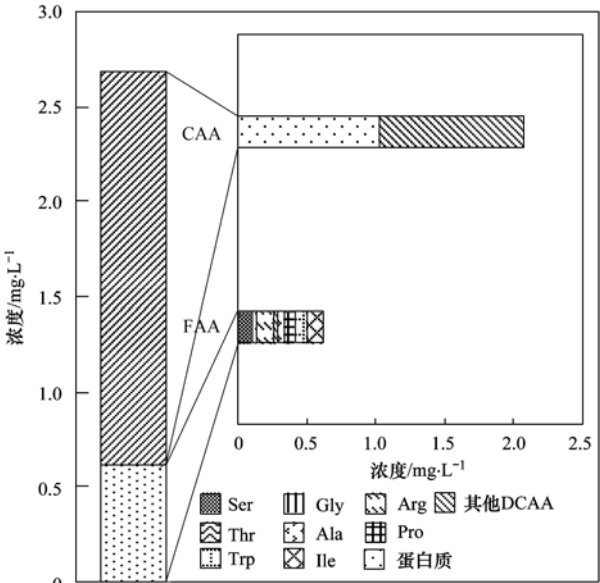


图 7 出水氨基酸中各组分含量

Fig. 7 Each component content of DFAA in effluent

由于氮源的代谢是微生物生长所需的最基本的物质代谢之一,微生物体内氨基酸态氮的产生主要来源于氨,因此氨的同化是微生物体内氮代谢的核心.一般而言,根据不同的生物合成途径可将微生物同化氨氮合成游离态氨基酸的过程归结为酮戊二酸、草酰乙酸、丙酮酸、甘油酸-3-磷酸、赤藓糖 4-磷酸与烯醇式丙酮酸磷酸等主要的代谢类型^[25].而污水中的游离态氨基酸又将进一步在微生物体内进行脱氨基、脱羧基等代谢活动以合成蛋白质、胺类等复杂的含氮有机化合物,具体的微生物转化氨氮合成有机氮的形成途径如图8所示.

2.3 污水的相对分子质量分布及荧光特性

2.3.1 三维荧光特性分析

为了明确沿程中有机物的构造变化,通过测定有机物的三维荧光光谱变化可以定性地判断污水随管网沿程中有机物变化情况.污水在管网沿程0、300、900、1200 m处的三维荧光光谱(图9)上共出现4个明显的荧光峰.其中峰1在激发波长/发射

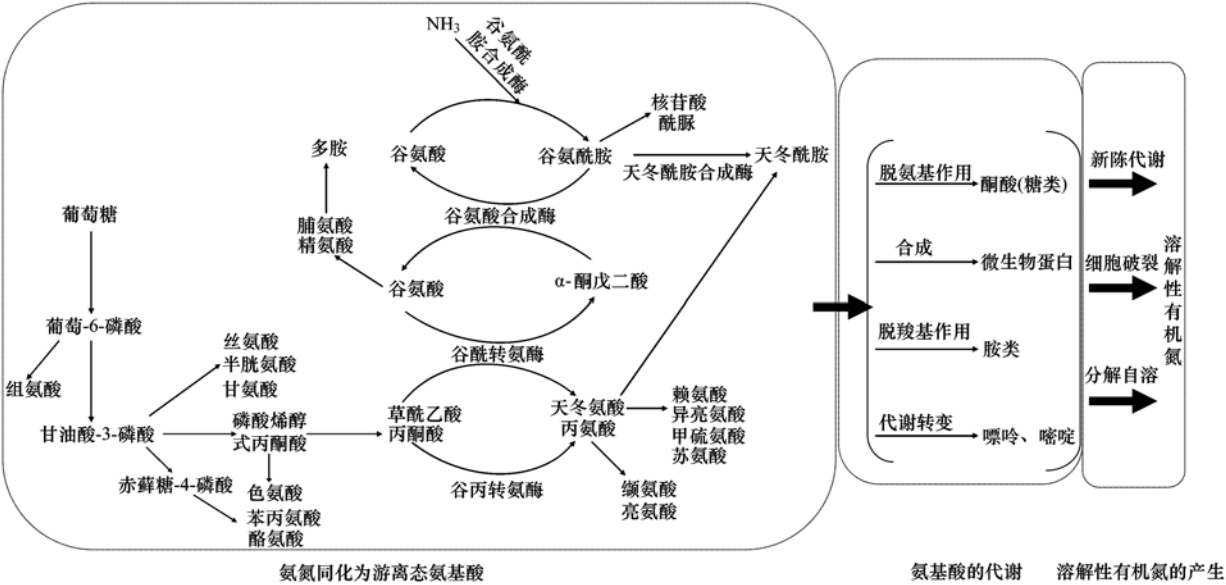


图 8 溶解性有机氮的形成途径

Fig. 8 Synthesis of soluble organic nitrogen

波长(E_x/E_m) = 237 ~ 260/400 ~ 500 nm 区域内,是类富里酸荧光峰;峰 2 在(E_x/E_m) = 300 ~ 370/400 ~ 500 nm 区域内,是类腐殖酸荧光峰. 峰 3 在(E_x/E_m) = 225 ~ 237/330 ~ 381 nm 的区域内,是类芳香族蛋白质荧光峰;峰 4 在(E_x/E_m) = 275/316 ~ 348 nm 区域内,是类溶解性微生物代谢产物荧光峰^[26~28]. 图 9 中各荧光峰的 E_x/E_m 以及相应的荧光强度列于表 3 中.

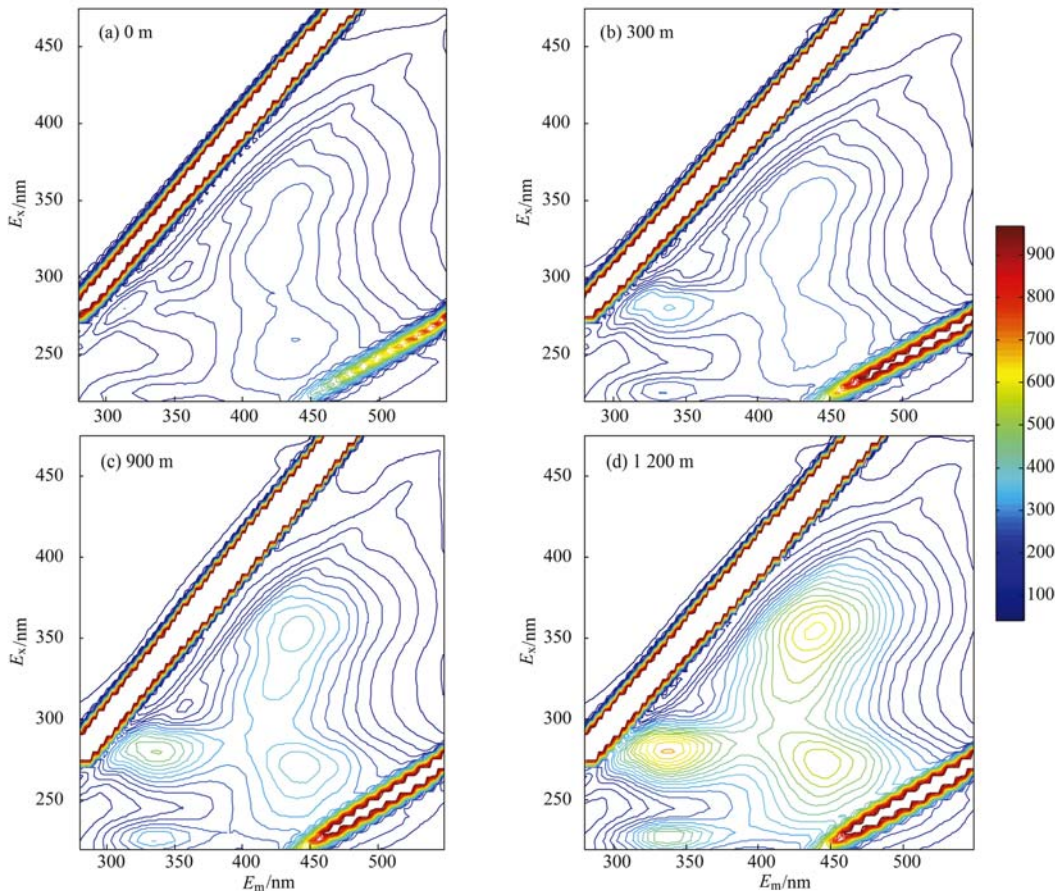


图 9 污水沿程的三维荧光光谱图

Fig. 9 Three dimensional projections of DOM fractions

表 3 污水沿程中荧光峰的位置和强度

距离/m	类芳香族蛋白质		类溶解性微生物代谢产物		类富里酸		类腐殖酸	
	E_x/E_m	荧光强度	E_x/E_m	荧光强度	E_x/E_m	荧光强度	E_x/E_m	荧光强度
0	—	—	—	—	265/444	312.72	—	—
300	225/334	269.84	280/316	297.18	260/440	313.61	350/436	311.78
900	225/336	369.88	280/336	494.12	270/438	363.83	350/436	372.45
1 200	230/338	485.31	280/320	687.95	270/444	581.55	355/440	628.17

如图 9 所示,进水 0 m 处的三维荧光光谱图上仅有一个显著类富里酸荧光峰,而其他 3 个特征荧光峰的荧光强度较弱;而在管网 300、900、1 200 m 处污水中均出现类富里酸、类腐殖酸、类芳香族蛋白质以及类溶解性微生物代谢产物的特征荧光峰,且荧光强度呈现增强的趋势.从图 9 和表 3 的数据结果表明,污水在随管网沿程流动的过程中,水中溶解性有机物的荧光物质逐渐增多,并主要以类芳香蛋白、类溶解性微生物代谢产物为主.其原因可能与微生物同化氮氮转化生成生物体蛋白有关,而体内合成的微生物蛋白一方面又随着微生物的衰亡以胞外聚合物(EPS)的形式释放到水体中,从而引起污水中荧光性物质的增多.

2.3.2 相对分子质量分布

高效体积排阻色谱(HPSEC)由于对水样的预处理要求简单、进样量小以及分析快速的优点而被用于污水中溶解性有机物(DOM)相对分子质量的表征.其中,紫外检测器在所有与 HPSEC 连接使用的检测器(荧光检测器、示差检测器)中应用尤为广泛^[29].研究表明,相比其他波长,紫外波长 254 nm 下测定出色谱峰的变化代表了污水中含有芳香结构的有机化合物的变化^[30].因此,为了进一步表明污水中具有大分子芳香类结构物质的形成,选定在紫外波长 254 nm 下对沿程水样进行测定.结果如图 10 所示.

污水经过沿程 1 200 m 的流动后水中有有机物质

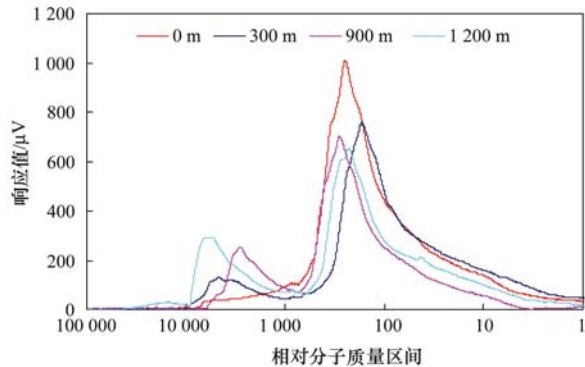


图 10 有机物相对分子质量沿程变化

Fig. 10 Variation of organic molecularweight along sewer pipe

的相对分子质量分布发生了改变,进水中的相对分子质量分布主要集中在 100~500 的小分子区间内,而>1 000 的相对分子质量的响应值较为微弱,随着污水的流动,出水中大分子量(1 000~10 000)有机物质有所形成.不仅相对分子质量分布发生改变,同时有机物的紫外吸收强度也随着相对分子质量分布的改变而发生变化.其中,相对分子质量区间在 100~1 000 区间的有机物吸光强度有所减弱,相对分子质量分布在 1 000~10 000 的有机物的吸光强度有所增强.其原因可能是微生物的同化作用将水中亲水性小分子有机物转化成大分子物质,使水中小分子有机物含量减少.由此进一步表明污水中类芳香族蛋白质荧光峰强度的增强可能与水中具有芳香结构有机物的形成有关.

3 结论

(1)管网微生物能够利用氨态氮作为唯一氮源合成细胞物质进行增殖,形成的微生物相种类丰富,且主要以杆菌、丝状菌、球菌为主,对污水中营养盐的去除起到一定的去除效果.

(2)微生物在进行增殖的同时将水中铵态氮转化为含氮有机化合物,该类有机氮化合物主要来源于微生物代谢产物,主要包括氨基酸、蛋白质、核酸及其他一些复杂有机氮化合物(氨基糖、腐殖质等),其中氨基酸在 DON 中占有绝大多数的比例.

(3)污水在管网输送过程中有机物的荧光强度逐渐增强,污水中类芳香蛋白、类溶解性微生物代谢产物的荧光物质增多,表明微生物蛋白是微生物同化氮氮转化的最主要的有机氮化合物;相对分子质量的分布结果表明污水中类芳香族蛋白质荧光峰强度的增强,主要原因在于微生物的同化作用将水中亲水性小分子有机物转化成具有芳香结构有机大分子物质,使水中小分子有机物含量减少.

参考文献:

[1] Hvitved-Jacobsen T, Raunkjaer K, Nielsen P H. Volatile fatty acids and sulfide in pressure mains [J]. Water Science and Technology, 1995, 31(7): 169-179.

- [2] Leu H G, Ouyang C F, Su J L. Effects of flow velocity changes on nitrogen transport and conversion in an open channel flow [J]. *Water Research*, 1996, **30**(9): 2065-2071.
- [3] Raunkjær K, Nielsen P H, Hvitved-Jacobsen T. Acetate removal in sewer biofilms under aerobic conditions[J]. *Water Research*, 1997, **31**(11): 2727-2736.
- [4] Warith M A, Kennedy K, Reitsma R. Use of sanitary sewers as wastewater pre-treatment systems [J]. *Waste Management*, 1998, **18**(4): 235-247.
- [5] Tanaka N, Hvitved-Jacobsen T. Transformations of wastewater organic matter in sewers under changing aerobic/anaerobic conditions[J]. *Water Science and Technology*, 1998, **37**(1): 105-113.
- [6] Tanaka N, Takenaka K. Control of hydrogen sulfide and degradation of organic matter by air injection into a wastewater force main[J]. *Water Science and Technology*, 1995, **31**(7): 273-282.
- [7] Chen G H, Leung D H W. Utilization of oxygen in a sanitary gravity sewer [J]. *Water Research*, 2000, **34**(15): 3813-3821.
- [8] Chen G H, Leung D H W, Huang J C. Removal of dissolved organic carbon in sanitary gravity sewer [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2001, **127**(4): 295-301.
- [9] Chen G H, Leung D H W, Huang J C. Biofilm in the sediment phase of a sanitary gravity sewer[J]. *Water Research*, 2003, **37**(11): 2784-2788.
- [10] 孙锦宜. 含氮废水处理技术与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003. 33-37.
- [11] Van Benthum W A J, Derissen B P, van Loosdrecht M C M, *et al.* Nitrogen removal using nitrifying biofilm growth and denitrifying suspended growth in a biofilm airlift suspension reactor coupled with a chemostat[J]. *Water Research*, 1998, **32**(7): 2009-2018.
- [12] 高廷耀, 周增炎, 朱晓君. 生物脱氮工艺中的同步硝化反硝化现象[J]. *给水排水*, 1998, **24**(12): 6-9.
- [13] Mulder A, van de Graaf A A, Robertson L A, *et al.* Anaerobic ammonium oxidation discovered in a denitrifying fluidized bed reactor[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 1995, **16**(3): 177-184.
- [14] Ozer A, Kasirga E. Substrate removal in long sewer lines[J]. *Water Science and Technology*, 1995, **31**(7): 213-218.
- [15] Jiang G M, Gutierrez O, Yuan Z G. The strong biocidal effect of free nitrous acid on anaerobic sewer biofilms [J]. *Water Research*, 2011, **45**(12): 3735-3743.
- [16] Baban A, Talinli I. Modeling of organic matter removal and nitrification in sewer systems-an approach to wastewater treatment [J]. *Desalination*, 2009, **246**(1-3): 640-647.
- [17] 马晓丽, 孟磊, 巴吐尔, 等. 两种柱前衍生化反相高效液相色谱法测定血液和尿液中游离氨基酸[J]. *氨基酸与生物资源*, 2012, **34**(3): 19-24.
- [18] Tsugita A, Uchida T, Mewes H W, *et al.* A rapid vapor-phase acid (hydrochloric acid and trifluoroacetic acid) hydrolysis of peptide and protein [J]. *The Journal of Biochemistry*, 1987, **102**(6): 1593-1597.
- [19] Keil R G, Kirchman D L. Dissolved combined amino acids in marine waters as determined by a vapor-phase hydrolysis method [J]. *Marine Chemistry*, 1991, **33**(3): 243-259.
- [20] Winters A L, Frank F R. Minchin Modification of the Lowry assay to measure proteins and phenols in covalently bound complexes [J]. *Analytical Biochemistry*, 2005, **346**(1): 43-48.
- [21] Rondel C, Marcato-Romain C E, Girbal-Neuhauser E. Development and validation of a colorimetric assay for simultaneous quantification of neutral and uronic sugars [J]. *Water Research*, 2013, **47**(8): 2901-2908.
- [22] 王怡, 柯莉, 刘雄科, 等. 模拟回用水管道微生物膜特征及其对铁、锰的富集[J]. *中国给水排水*, 2013, **29**(19): 1-5.
- [23] Jiang F, Leung D H W, Li S Y, *et al.* A biofilm model for prediction of pollutant transformation in sewers [J]. *Water Research*, 2009, **43**(13): 3187-3198.
- [24] 王景峰, 王暄, 季民. 好氧颗粒污泥膜生物反应器脱氮特性[J]. *环境科学*, 2007, **28**(3): 528-533.
- [25] Lea P J, Azevedo R A. Nitrogen use efficiency. 2. Amino acid metabolism [J]. *Annals of Applied Biology*, 2007, **151**(3): 269-275.
- [26] 王丽莎, 胡洪营, 滕江幸一. 污水氯和二氧化氯消毒过程中溶解性有机物变化的三维荧光光谱解析[J]. *环境科学*, 2007, **28**(7): 1524-1528.
- [27] Henderson R K, Baker A, Murphy K R, *et al.* Fluorescence as a potential monitoring tool for recycled water systems: A review [J]. *Water Research*, 2009, **43**(4): 863-881.
- [28] 安莹, 王志伟, 李彬, 等. 盐度冲击下 MBR 污泥 SMP 和 EPS 的三维荧光光谱解析[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(7): 1754-1762.
- [29] Pelekani C, Newcombe G, Snoeyink V L, *et al.* Characterization of natural organic matter using high performance size exclusion chromatography[J]. *Environment Science & Technology*, 1999, **33**(16): 2807-2813.
- [30] Zhang T, Lu J F, Ma J, *et al.* Comparative study of ozonation and synthetic goethite-catalyzed ozonation of individual NOM fractions isolated and fractionated from a filtered river water[J]. *Water Research*, 2008, **42**(6-7): 1563-1570.

CONTENTS

Source Contribution Analysis of the Fine Particles in Shanghai During a Heavy Haze Episode in December, 2013 Based on the Particulate Matter Source Apportionment Technology	LI Li, AN Jing-yu, YAN Ru-sha (3543)
Transformation Mechanism and Sources of Secondary Inorganic Components in PM _{2.5} at an Agriculture Site (Quzhou) in the North China Plain in Summer	CHEN Shi-yi, ZENG Li-min, DONG Hua-bin, <i>et al.</i> (3554)
Pollution Level and Sources of Organic Phosphorus Esters in Airborne PM _{2.5} in Chengdu City	YIN Hong-ling, LI Shi-ping, YE Zhi-xiang, <i>et al.</i> (3566)
Simulation Study of the Emission of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Sugar Alcohols from Biomass Burning	HUANG Shuai, HUANG Xin-yi, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (3573)
Characteristics and Parameterization for Atmospheric Extinction Coefficient in Beijing	CHEN Yi-na, ZHAO Pu-sheng, HE Di, <i>et al.</i> (3582)
Photocatalytic Degradation of Gaseous Toluene by a Photo-Fenton Reaction	ZHENG Si-can, CHEN Tian-hu, LIU Hai-bo, <i>et al.</i> (3590)
Emission of PCDD/Fs from Crematories and Its Influencing Factors	YIN Wen-hua, YU Xiao-wei, HAN Jing-lei, <i>et al.</i> (3596)
Odor Emission Characteristics from Biochemical Treatment Facilities of Kitchen Waste in China	ZHANG Yan, WANG Yuan-gang, LU Zhi-qiang, <i>et al.</i> (3603)
Temporal and Spatial Characteristics of Lake Taihu Surface Albedo and Its Impact Factors	CAO Chang, LI Xu-hui, ZHANG Mi, <i>et al.</i> (3611)
Remote Sensing Inversion of Diffuse Attenuation Coefficient in Lake Taihu Based on the GOCI Images	WANG Shan-shan, LI Yun-mei, WANG Qiao, <i>et al.</i> (3620)
Porewater Dissolved Methane in <i>Cyperus malaccensis</i> Marshes Along Salinity Gradient in the Minjiang River Estuary	YANG Ping, ZHANG Zi-chuan, DU Wei-ning, <i>et al.</i> (3633)
Stable Isotopes Characters of Soil Water Movement in Shijiazhuang City	CHEN Tong-tong, CHEN Hui, HAN Lu, <i>et al.</i> (3641)
Seasonal Variations in Vertical Profile of Hg Species and the Influential Factors in Changshou Reservoir	BAI Wei-yang, ZHANG Cheng, TANG Zhen-ya, <i>et al.</i> (3649)
Nutrient Characteristics and Nitrogen Forms of Rhizosphere Soils Under Four Typical Plants in the Littoral Zone of TGR	WANG Xiao-feng, YUAN Xing-zhong, LIU Hong, <i>et al.</i> (3662)
Exchange Fluxes and Coupling Relationship of Dissolved Inorganic Carbon and Dissolved Organic Carbon Across the Water-Sediment Interface in Lakes	WANG Wei-ying, LÜ Chang-wei, HE Jiang, <i>et al.</i> (3674)
Mass Transport in Porous Sediments During a Turbulent Disturbance	LI Shao-long, CHEN Dao-yi (3683)
Characterization of Pollutant Wash-off in the Urban Stormwater	WU Jun-liang, REN Yu-fen, WANG Xue-mei, <i>et al.</i> (3691)
Research of the Stormwater Runoff and Pollution Characteristics in Rural Area of Yuhang District, Hangzhou	DUAN Sheng-hui, ZHAO Yu, SHAN Bao-qing, <i>et al.</i> (3697)
Formation and Variation of Brominated Disinfection By-products in A Combined Ultrafiltration and Reverse Osmosis Process for Seawater Desalination	YANG Zhe, SUN Ying-xue, SHI Na, <i>et al.</i> (3706)
Effect of Natural Organic Matter and Electrolytes on the Aggregation of C ₆₀ Nanoparticles in Aquatic Systems	FANG Hua, JING Jie, YU Jiang-hua, <i>et al.</i> (3715)
Efficiency of Sediment Amendment with Zirconium-Modified Kaolin Clay to Control Phosphorus Release from Sediments in Heavily Polluted Rivers	WANG Hong, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (3720)
Transformation of Nitrogen Nutrients in the Urban Sewage Pipe Network	JIN Peng-kang, JIAO Ding, REN Wu-ang (3730)
Application of Micro-aerobic Hydrolysis Acidification in the Pretreatment of Petrochemical Wastewater	ZHU Chen, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (3738)
Efficacy of A ² /O-MBR Combined Process in Wastewater Treatment and the Characteristics of Membrane Fouling	WANG Xu-dong, MA Ya-bin, WANG Lei, <i>et al.</i> (3743)
Effect of High Ammonium on Nitrogen Removal in an Partial Nitrification-ANAMMOX Process with Reflux System	LI Xiang, CUI Jian-hong, YUAN Yan, <i>et al.</i> (3749)
Reductive Dechlorination of Trichloroethylene by Benzoate-Enriched Anaerobic Cultures	LI Jiang-wei, YANG Xiao-yong, HU An-yi, <i>et al.</i> (3756)
2,4,6-Trichlorophenol Mineralization Promoted by Anaerobic Reductive Dechlorination of Acclimated Sludge and Extracellular Respiration Dechlorination Pathway	SONG Jia-xiu, LI Ling, SHENG Fan-fan, <i>et al.</i> (3764)
Short or Long Term Influence of Phenol on Nitrogen Removal Efficiency of ANAMMOX Sludge	YANG Peng-bing, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (3771)
Process Optimization of Aerobic Granular Sludge Continuous-Flow System for the Treatment of Low COD/N Ratio Sewage	LU Lei, XIN Xin, LU Hang, <i>et al.</i> (3778)
Long-Term Inhibition of FNA on Aerobic Phosphate Uptake and Variation of Phosphorus Uptake Properties of the Sludge	MA Juan, LI Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (3786)
Performance and Factors Analysis of Sludge Dewatering in Different Wastewater Treatment Processes	LIU Ji-bao, LI Ya-ming, LÜ Jian, <i>et al.</i> (3794)
Effect of Residual Hydrogen Peroxide on Hydrolysis Acidification of Sludge Pretreated by Microwave -H ₂ O ₂ -Alkaline Process	JIA Rui-lai, LIU Ji-bao, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (3801)
Vertical Distribution Characteristics of Typical Forest Soil Organic Nitrogen in Dawei Mountain	DING Xian-qing, MA Hui-jing, ZHU Xiao-long, <i>et al.</i> (3809)
Effects of Different Land Uses on Soil Active Organic Carbon and Nitrogen Fractions in Jinyun Mountain	QI Xin, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (3816)
Control of Soil Nutrient Loss of Typical Reforestation Patterns Along the Three Gorges Reservoir Area	WU Dong, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (3825)
Effects of Slope Position and Soil Horizon on Soil Microbial Biomass and Abundance in Karst Primary Forest of Southwest China	FENG Shu-zhen, SU Yi-rong, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (3832)
Effects of Different Plantation Type on the Abundance and Diversity of Soil Microbes in Subtropical Red Soils	SHEN Bing-jie, ZHU Zhen-ke, YUAN Hong-zhao, <i>et al.</i> (3839)
Accumulation of Mercury in Soil-maize System of Non-ferrous Metals Smelting Area and Its Related Risk Assessment	JI Xiao-feng, ZHENG Na, WANG Yang, <i>et al.</i> (3845)
Effects of Different Modifier Concentrations on Lead-Zinc Tolerance, Subcellular Distribution and Chemical Forms for Four Kinds of Woody Plants	CHEN Yong-hua, ZHANG Fu-yun, WU Xiao-fu, <i>et al.</i> (3852)
Isolation, Purification and Identification of Antialgal Activity Substances of Ethyl Acetate Extracts from the Submerged Macrophytes <i>Potamogeton crispus</i>	SUN Ying-ying, SU Zhen-xia, PU Yin-fang, <i>et al.</i> (3860)
Distribution Characteristics and Potential Risk of CBs in Aquatic Organisms from Typical Epidemic Areas of Schistosomiasis Prevalence	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (3866)
Application of Whole-cell Biosensor ADPI _p WHlux for Acute Toxicity Detection in Water Environment	TANG Hui, SONG Yi-zhi, JIANG Bo, <i>et al.</i> (3872)
Application of Rainbow Trout CYP1 Gene Expression Patterns in Gill and Liver for Haihe River Bio-monitoring	GAO Kai, YAN Pei, TAN Cui-ling, <i>et al.</i> (3878)
Toxic Effect of Nano-ZnO in Liver of Zebrafish	LIU Lin, ZHAO Qun-fen, JIN Kai-xing, <i>et al.</i> (3884)
Acute Toxicity of <i>Coptis chinensis</i> Rhizome Extracts to <i>Daphnia carinata</i>	CHEN Ya-nan, YUAN Ling (3892)
Adsorption-desorption Characteristics of Fermented Rice Husk for Ferrous and Sulfur Ions	XIE Xiao-mei, LIAO Min, HUA Jia-yuan, <i>et al.</i> (3896)
Application of Stir Bar Sorptive Extraction and Gas Chromatograph Mass Spectrometer to the Phthalic Acid Esters Analysis in Seawater	GAO Chen-chen, LI Feng-min, LU Lun, <i>et al.</i> (3906)
Experimental Conditions and Reliability Analysis of Results of COD Components	LI Zhi-hua, ZHANG Yin, HAN Xing, <i>et al.</i> (3913)
Method for Simultaneous Determination of 11 Veterinary Antibiotics in Piggery Wastewater and Sludge and Its Application in Biological Treatment	DING Jia-li, LIU Rui, ZHENG Wei, <i>et al.</i> (3918)
Research Progress in Technology of Using Soil Micro-organisms to Generate Electricity and Its Potential Applications	DENG Huan, XUE Hong-jing, JIANG Yun-bin, <i>et al.</i> (3926)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

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
欧阳自远 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)

2015年10月15日 第36卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 10 Oct. 15, 2015

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	欧阳自远	Editor-in-Chief		OUYANG Zi-yuan
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	中国国际图书贸易总公司 (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