

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第5期

Vol.38 No.5

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南京工业区分冬季二次有机气溶胶浓度估算及来源解析 刘静达,安俊琳,张玉欣,师远哲,林旭 (1733)

南京北郊大气细粒子在人体呼吸系统沉积特性 梁静舒,安俊琳,王红磊,张玉欣,王俊秀,施双双,王潇 (1743)

广西北海涠洲岛春季大气颗粒物浓度特征及影响因素 高元官,张凯,王体健,陈志明,耿红,孟凡 (1753)

神农架大九湖大气中的多环芳烃 金梦云,邢新丽,柯艳萍,郑煌,胡天鹏,孙焰,丁洋,李绘,张泽洲,祁士华 (1760)

沧州市春季 NMHCs 空间分布特征 段菁春,周雪明,张鹤丰,谭吉华,胡京南,柴发合 (1769)

北京市民用燃煤烟气中气态污染物排放特征 梁云平,张大伟,林安国,马召辉,邹晓东 (1775)

生活垃圾堆肥设施 VOCs 排放特征及臭氧生成潜势分析 邵珠泽,郑国砥,王元刚,高定,朱彦莉,陈同斌,聂二旗 (1783)

低温等离子体对复合 CVOCs 的降解特性 姜理英,张迪,郭海倩,缪晶晶,陈怡伶,李慧 (1792)

运城市道路扬尘化学组成特征及来源分析 武媛媛,李如梅,彭林,端允,王海京,李颖慧,白慧玲,牟玲 (1799)

高架道路周边建筑物灰尘重金属污染风险:以常州市为例 姚静波,王明新,齐今笛,孙向武,张文艺 (1807)

上海降水中氢氧同位素特征及与 ENSO 的关系 董小芳,邓黄月,张杰,朱志鹏,王琳,郑祥民,周立旻 (1817)

DOC + CDPF 对重型柴油车排放特性的影响 张允华,楼狄明,谭丕强,胡志远 (1828)

我国重点城市饮用水中砷健康累积风险评价 张秋秋,潘申龄,刘伟,张昱,安伟 (1835)

基于 Monte Carlo 模拟法对水源水体中微囊藻毒素的健康风险评估 王阳,徐明芳,耿梦梦,黎明,陈耕南 (1842)

北京城区水体中 PPCPs 的分布特征及潜在风险 张盼伟,周怀东,赵高峰,李昆,赵晓辉,刘巧娜,任敏,赵丹丹,李东佼 (1852)

长江口及邻近海域春夏季有色溶解有机物时空分布特征及主要影响因素 孙语嫣,白莹,苏荣国,石晓勇 (1863)

垃圾填埋有色溶解性有机质与铜络合机制 肖骁,何小松,高如泰,席北斗,张慧,黄彩红,李丹,袁志业 (1873)

3 种生物滞留设计对城市地表径流溶解性氮的去除作用 李立青,胡楠,刘雨情,涂声亮,陈华超 (1881)

三峡库区小流域稻田空间格局对氮磷流失影响 陈成龙,高明,倪九派,谢德体,邓华 (1889)

NO₃⁻-N 负荷对树皮填料人工湿地早期反硝化及释碳速率的影响 姜应和,李瑶,张莹,张翔凌 (1898)

湿地基质及阴极面积对人工湿地型微生物燃料电池去除偶氮染料同步产电的影响 李薛晓,程思超,方舟,李先宁 (1904)

阳极材料对 6 L 微生物燃料电池性能及有机废水处理效果的影响 丁为俊,于立亮,陈杰,成少安 (1911)

臭氧-混凝交互作用对水体有机物的影响 刘海龙,付晶森,郭雪峰,柴建恬,张忠民 (1918)

紫外线和次氯酸钠对 *Escherichia coli* 和 Poliovirus 的消毒作用 徐丽梅,张崇森,王晓昌,吉铮,周进宏 (1928)

不同沉淀 pH 值条件下制备的水合氧化铝对水中磷酸盐的吸附作用 王星星,林建伟,詹艳慧,张志斌,邢云青,姜博汇,储鸣 (1936)

树脂基纳米钛锆氧化物复合吸附剂同步去除水中磷和氟 陈家凯,聂广泽,刘志英,姚远,徐炎华 (1947)

灼烧净水污泥投加方式对磷吸附和磷形态的影响 朱培颖,李大鹏,于胜楠 (1957)

城市污水管网中污染物冲刷与沉积规律 桑浪涛,石烜,张彤,付博文,金鹏康 (1965)

11 种邻苯二甲酸酯在好氧污水处理系统中的归趋 周林军,古文,刘济宁,石利利,徐炎华 (1972)

反硝化抑制硫酸盐还原的工艺特性 金鹏康,杨珍瑞,李蓉,李岩,周立辉 (1982)

Fe⁽⁰⁾-活性炭强化短程反硝化脱氮及影响因素 吕永涛,刘婷,曾玉莲,孙婷,张瑶,王磊 (1991)

两种不同抑制策略下部分亚硝化系统运行特性比较 李惠娟,彭党聪,陈国燕,王博,姚倩,卓杨 (1997)

基质比对 ABR 厌氧氨氧化工艺脱氮性能的影响 闰刚,徐乐中,沈耀良,吴鹏,张婷, Samwine Thomas (2006)

温度对 SCSC-S/Fe 复合系统脱氮除磷及微生物群落特性的影响 范军辉,郝瑞霞,朱晓霞,万京京,刘思远,王丽沙 (2012)

SCAR 处理城市生活污水的效能及其微生物群落动态分析 杨波,徐辉,冯修平,李方,田晴,马春燕 (2021)

喹啉降解菌 *Ochrobactrum* sp. 的好氧降解特性及其在焦化废水中的生物强化作用 徐伟超,吴翠平,张玉秀,张琪,张怡鸣 (2030)

锰氧化菌 *Arthrobacter* sp. HW-16 的锰氧化特性和氧化机制 万文结,薛芷筠,张泽文,何冬兰 (2036)

温度对海洋厌氧氨氧化菌脱氮效能的影响 周同,于德爽,李津,吴国栋,王晓静 (2044)

包埋固定化活性污泥脱氮特性与微生物群落分析 许晓毅,尤晓露,吕晨培,王斌,胡碧波 (2052)

强化两相污泥高固厌氧消化系统的微生物群落 曹知平,吴静,左剑恶,王晓璐,王翀,王广启,王凯军,钱易 (2059)

三峡库区城乡消落带人工植被恢复土壤放线菌多样性特征 秦红,任庆水,杨文航,李昌晓 (2065)

川中丘陵区农田源头沟渠玉米季中氧化亚氮排放及其影响因素 田琳琳,朱波,汪涛,赵原,董宏伟,任光前,胡磊 (2074)

双氰胺对冬闲稻田和油菜地 N₂O 排放的影响 伍延正,张苗苗,秦红灵,陈春兰,王娟,魏文学,李勇 (2084)

生物炭介导的不同地表条件下土壤 N₂O 的排放特征 邹娟,胡学玉,张阳阳,张迪,陈威,王向前,陈窈君,刘扬 (2093)

垄作秸秆覆盖下西南地区蚕豆田土壤呼吸与有机碳特征 熊瑛,王龙昌,杜娟,赵琳璐,周泉,张赛 (2102)

广东省土壤 Cd 含量空间分布预测 孙慧,郭治兴,郭颖,袁宇志,柴敏,毕如田,杨静 (2111)

宿鸭湖沉积物重金属空间分布及潜在生态风险评价 张鹏岩,康国华,庞博,郭依,何坚坚,秦明周 (2125)

腐殖酸活性组分及其比例对紫色潮土中铅形态转化和有效性演变动态的影响 王青清,蒋珍茂,王俊,魏世强 (2136)

紫色水稻土颗粒有机质对重金属的富集特征 李秋言,赵秀兰 (2146)

生物炭增强黄绵土对西替利嗪的吸附作用 吴志娟,毕二平 (2154)

两种木材生物炭对铜离子的吸附特性及其机制 王彤彤,马江波,曲东,张晓媛,郑纪勇,张兴昌 (2161)

牛粪源粪炭及其生物炭对 Pb²⁺、Cd²⁺ 的吸附特性 杜文慧,朱维琴,潘晓慧,沈旭阳,陈思远,陈可乐,坎吉汗·木沙拉,张杭君,丁颖 (2172)

C₃N₄/BiOBr 复合可见光催化剂的性能及其作用机制 鲍玥,周旻昀,邹骏华,史宇滨,万先凯,史惠祥 (2182)

《环境科学》征稿简则(2020) 《环境科学》征订启事(2035) 信息(1782, 1798, 1827)

城市污水管网中污染物冲刷与沉积规律

桑浪涛, 石焯, 张彤, 付博文, 金鹏康*

(西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710055)

摘要: 为探明城市污水管网中污染物的冲刷与沉积规律, 对西安市污水管网进行实际调研, 结果表明, 污水支管和干管的沉积物厚度时变化较大, 变化量分别为 0~24 mm 和 0~12 mm, 管道污水中颗粒态污染物发生沉积和冲刷的概率高; 而污水主干管的沉积物厚度时变化较小, 管道内颗粒物沉积与沉积物冲刷水平维持相对平衡。为进一步明确污水中污染物浓度变化与水流流速的关系, 建立了污水管道冲刷与沉积模拟中试装置, 研究了不同流速下管道中碳(有机)、氮、磷三类污染物含量和粒径分布的变化规律。结果表明, 随着污水流速的增加, 冲刷强度增大, 管道中污染物浓度急剧升高, 通过粒径分布监测结果可知, 管道中有机污染物易存在于粒径较大的颗粒物上, 氮、磷类污染物易吸附在粒径较小的颗粒物上; 当流速小于 $0.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 污水中颗粒态污染物的沉积作用大于冲刷作用, 发生物理沉积, 造成污水中碳源不足, 当流速大于 $0.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 水流冲刷强度增大, 沉积物被水流大量携带, 但污水中碳类有机污染物的增加比重大于氮和磷类污染物, 使现有污水碳源不足得到改观, 利于生物脱氮除磷工艺的碳源需求。

关键词: 城市污水管网; 污染物; 沉积物; 冲刷与沉积; 污水水质

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)05-1965-07 DOI: 10.13227/j.hjks.201610033

Law of Pollutant Erosion and Deposition in Urban Sewage Network

SANG Lang-tao, SHI Xuan, ZHANG Tong, FU Bo-wen, JIN Peng-kang*

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

Abstract: In order to investigate the scouring and deposition law of pollutants in urban sewer systems, the investigation of sewer systems was carried out in Xi'an. The results showed that the thickness of sediment in the branch pipe and the main pipe varied obviously. At the peak of the drainage, the velocity increased gradually, and the thickness of the pipeline sediment decreased. At the bottom of the drainage trough, the changes of the velocity and the thickness of the pipeline sediment were opposite, with variations of 0-24 mm and 0-12 mm, respectively. And the probability of granular contaminants sedimentation and scouring in sewer systems was high, while the thickness of sediment in sewage main pipe was less than the above mentioned pipes, the variation of which was 0-7 mm. In addition, the sedimentation and scouring in the main pipeline kept relatively balanced and the thickness of sediment remained stable. In order to clarify the relationship between the concentration of pollutants and the flow velocity, a pilot sewer system was established. The effects of different flow rates, which were 0.1, 0.3, 0.6, 0.9, 1.2 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, respectively, on the contents of carbon (organic), nitrogen and phosphorus in the pipeline were studied. The results showed that with the increase of the flow velocity, the scour intensity increased and the concentration of pollutants in the pipeline also increased sharply. As shown by the monitoring results of the static light scattering particle size analyzer, the carbon organic pollutants in the pipeline were easily adsorbed on the larger particles, while nitrogen and phosphorus pollutants were easily adsorbed on the particles with smaller size. Analysis on the change of the urban sewage pipeline showed, when the flow rate was less than $0.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, the sedimentation of granular pollutants in the sewage was greater than the scouring effect. When the flow velocity was higher than $0.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, the water scouring intensity increased and the scouring action was greater than the sedimentation, meanwhile, the sediments were carried by the water and the thickness of the sediments was reduced. The increase of the organic pollutants in the sewage was bigger than the nitrogen and phosphorus pollutants, so that the existing sewage carbon source was improved.

Key words: urban sewage pipe network; pollutants; sediment; scour and sediment; sewage water quality

城市排水管网, 尤其是老城区管网, 由于污水中颗粒态物质的存在, 均出现了不同程度的淤积和堵塞^[1], 且随着污水流量的不均匀变化, 沉积物被冲刷再悬浮, 释放污染物质, 产生二次污染^[2,3], 造成管道污染物负荷增加, 引起污水厂进水水质不规律波动^[4]; 甚至在合流制管道中, 污染物的释放还会严重威胁受纳水体的水环境^[5,6]。因此, 研究城市污水管网中污染物在不同水力条件下的冲刷与沉积规律十分必要。

城市污水管道内部环境复杂, 并且污水流量、流速的变化波动等与人们的生活习惯密切相关。而污水流速的不均匀交替变化, 导致管道沉积物受到

收稿日期: 2016-10-08; 修订日期: 2016-11-24

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

作者简介: 桑浪涛(1991~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水与废水的深度处理技术, E-mail: 1271129308@qq.com

* 通信作者, E-mail: pkjin@hotmail.com

不同程度的冲刷与沉积^[7]。有研究表明,沉积物受水流冲刷随溢流进入受纳水体,会造成水体污染^[8,9],如在合流制溢流产生的污染物总量中约80%污染负荷来自排水管道内沉积物^[10];相关研究^[11]也表明西安市污水管网形成沉积物的主要原因为流速小于 $0.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 情况下,污水管道以直角汇入到干管中而造成的,且合流制管段中沉积物的含量大于分流制管道;Bertrand-Krajewski 等^[12]的研究认为排水系统中沉积污染物的再悬浮对径流中SS和COD的贡献均为60%。目前国内关于沉积物的研究主要集中在沉积冲刷模型方面^[13],尚未对污水管网中污染物在不同水力条件下的冲刷与沉积规律进行系统研究。又由于高强度水流冲刷造成的污染物含量剧增,势必会增加污水处理厂进水污染物负荷,破坏污水中碳氮磷的物质平衡。针对城市排水管网输送至污水处理厂的进水水质,国内外实验研究表明^[14],当进水C/P < 20且C/N < 6时,现行脱氮除磷工艺都会因碳源偏低,难以实现同步脱氮除磷的效果,实际应用中氮和磷的排放都难以达到国家一级A排放标准。为此,本研究对西安市污水管网系统进行实际调研,并建立一套管道冲刷与沉积模拟实验装置,探究城市污水管网中污染物在不同水力条件下的冲刷与沉积规律,进而评价其对污水处理厂进水水质的影响。

1 材料与方法

1.1 调研样本选取和方法

根据西安市污水管网的划分特征,对全市已铺设的污水管道约1 350 km^[15](含合流制)进行典型管段实际调研。经过前期调研分析^[16,17],选取了西安市第二污水厂污水收集区域的污水管道作为研究管段,总管线长度约9.67 km,排水体制为雨污完全分流制,附近主要为居民区和商业区。为了研究方便,将污水从用户流出至支管,经过干管、主干管,并最终流入污水处理厂过程中的收集管道划分为三类:①主干管(与污水处理厂直接连接, DN1000-1200);②干管(与污水主干管连接, DN800-500);③支管(与用户直接连接, DN600-300),如图1所示,作为典型管路(钢筋混凝土)进行监测。

为研究调研区域管道内沉积物的变化特性,采用装配有闭路电视监测与声纳监测系统的管道机器人^[18]进行沉积物厚度监测,如图2所示。与此同时,通过哈希 sigma950 型流量计测量管道的水深、流速、流量信息。



图1 典型管段监测点示意

Fig. 1 Typical line of sewers

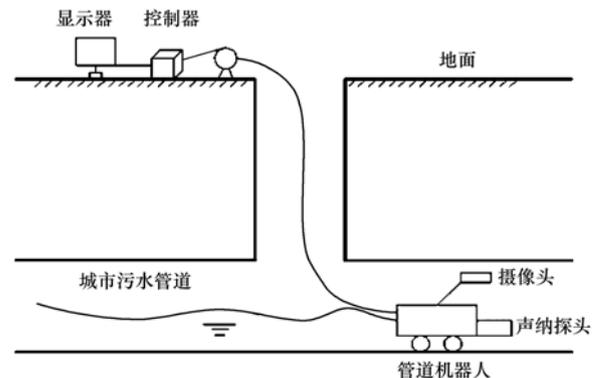
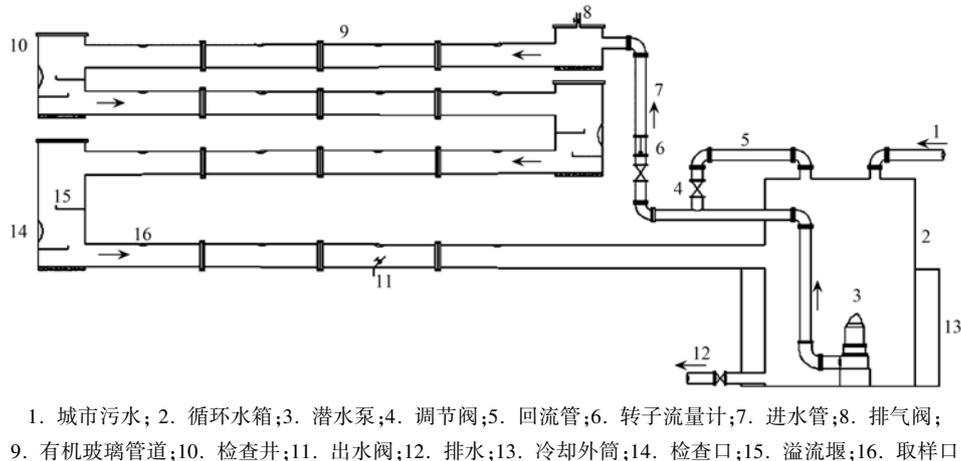


图2 管道机器人工作示意

Fig. 2 Working figure of pipeline robot

1.2 实验装置

如图3所示,建立了一套模拟管道实验装置,管径为200 mm,总有效长度32 m,模拟管段有4层,层与层之间通过尺寸 $D \times H$ 为400 mm × 600 mm的圆柱形检查井连接,同时管段连接处均采用法兰及橡胶圈密封,确保装置的严格密封性。模拟管道上每层设置出水阀和取样口,以便取样分析。装置顶部检查井内设有挡水溢流堰,以保证水流流态;并在顶部检查井内设排气口及排气阀,使进水的同时排走管内空气,保证污水 $\text{DO} < 0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。装置用铸铁架支撑,坡度可调节。模拟管道及检查井均采用有机玻璃材质,并用2 cm厚的保温材料将其包裹,以模拟实际污水管网避光恒温的环境。管道内壁适当打磨以控制管道沿程阻力系数及雷诺数,使管道内壁粗糙度与实际钢筋混凝土管的粗糙度^[19,20]相接近,从而保证其流动特性与实际污水管道相仿^[21]。循环水箱尺寸 $D \times H$ 为1 500 mm × 1 600 mm,水箱



1. 城市污水; 2. 循环水箱; 3. 潜水泵; 4. 调节阀; 5. 回流管; 6. 转子流量计; 7. 进水管; 8. 排气阀;
9. 有机玻璃管道; 10. 检查井; 11. 出水阀; 12. 排水; 13. 冷却外筒; 14. 检查口; 15. 溢流堰; 16. 取样口

图3 城市污水管道模拟示意

Fig. 3 Schematic diagram of urban sewerage simulation

外设置有外筒,通过水冷方式保证循环水箱内污水温度与原始污水温度相接近。

1.3 模拟实验条件及进水水质

1.3.1 实验条件

污水管道模拟装置在室温下运行,实验温度为 $(25 \pm 2)^\circ\text{C}$,装置密封性良好,溶解氧(DO)为 $(0.3 \pm 0.1)\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。实验进水通过污水管道内放置的潜污泵提升至模拟管道系统的循环水箱,之后在模拟管道系统中进行内循环以模拟实际污水管网。

1.3.2 进水水质

实验用污水取自于西安市城市污水管网,TCOD(总有机物)、TN(总氮)以及TP(总磷)浓度分别为 $417 \sim 730$ 、 $39.80 \sim 61.72$ 以及 $6.95 \sim 9.68\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,pH为 $6.5 \sim 7.5$ 。

1.4 样品采集

城市污水管道模拟系统在流速为 $0.15\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的缓流条件下,每日更换城市污水,水力停留时间10 h,稳定运行150 d后,模拟管道中沉积物厚度约60 mm,且沉积物的密实度与实际污水管道中沉积现象相似,进行中试实验。调节不同流速,待模拟系统稳定运行15 min后,打开取样口进行测样。

1.5 分析方法

粒径分布采用马尔文2000激光粒度仪进行测量;不同粒径段的污染物含量采用筛网逐级筛分检测;化学需氧量COD采用重铬酸钾法测定;总氮TN采用碱性过硫酸钾消解法测定;总磷TP采用钼锑抗分光光度法^[22]测定。

实验采集的样品都采用随取随测的原则。且每个取样点的分析都设置3组平行样测定,取平均值作为最终有效数据。

2 结果与讨论

2.1 城市污水管道中沉积物的变化特征

管道中沉积物厚度及流速变化结果如图4所示。污水支管和干管沉积物厚度的变化量分别为 $0 \sim 24\text{mm}$ 和 $0 \sim 12\text{mm}$,日变化较大,主要由于其直接连接用水用户,排水量时变化系数较大,在一天当中管段污水中颗粒态污染物的沉积与被冲刷携带的概率高。在排水高峰期时,流速急骤增加,污水支管和干管的流速达到 $0.26\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $0.44\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,水流紊流强度加大,携带能力增强,对管道沉积物造成冲刷相对显著,管道沉积物厚度存在减小趋势。在排水低谷时,流速急骤减小,污水支管和干管的流速分别降至 $0.03\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $0.26\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,水流冲刷强度相对较弱,污水中的污染物颗粒发生沉积的几率大于污染物颗粒随水流迁移的几率,管道沉积物厚度增加。而污水主干管沉积物厚度的变化量为 $0 \sim 7\text{mm}$,日变化较小,主要由于其在一天当中流量较大,且流速基本稳定在 $0.61 \sim 0.72\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 范围内,同时管径较大,水流紊流强度小,流态较稳定,因此,管道内污染物颗粒沉积与沉积物冲刷水平维持相对平衡,管道沉积物厚度保持基本稳定。

2.2 不同流速下污水管道中污染物的变化

为研究不同流速下管道污染物的变化情况,本实验通过管道模拟中试装置研究了 0.1 、 0.3 、 0.6 、 0.9 、 $1.2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 这5种不同流速下污水中TCOD、TN、TP及沉积物厚度的变化规律。如图5所示,不同流速下管道污水中TCOD、TN、TP浓度存在明显差异,且随着流速的增加,TCOD、TN、TP浓度呈递增趋势;而管道沉积物随着水流冲刷强度的增加,厚

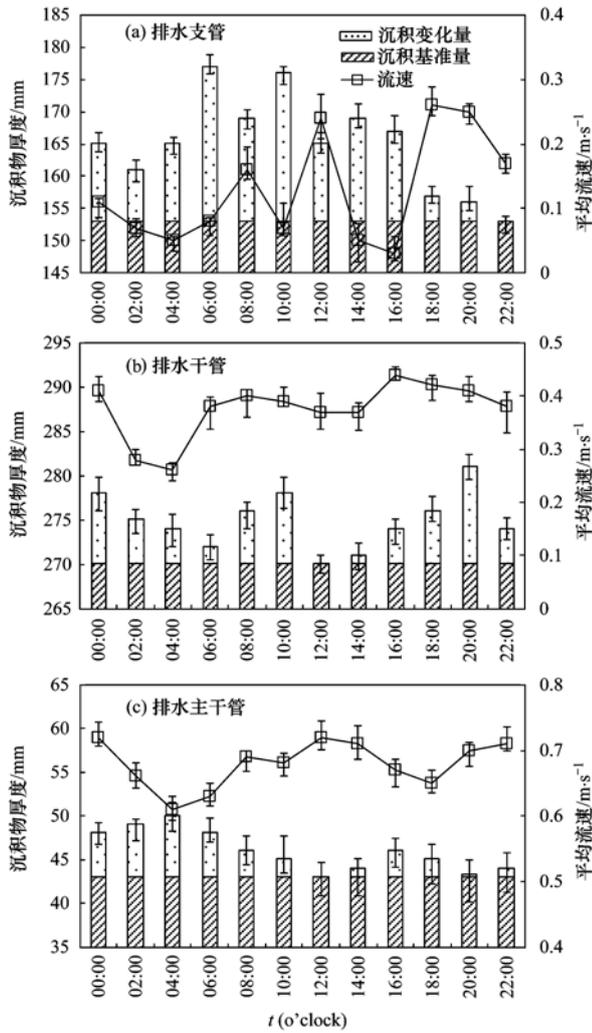


图 4 各级管道沉积物时变化情况

Fig. 4 Variation of sediment at all levels of pipeline

度呈递减趋势。

当水流流速由 $0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 增加到 $1.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 污水中 TCOD 由 $371.33 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 增加到 $1725.36 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, TN 由 $31.11 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 增加到 $81.26 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, TP 由 $5.71 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 增加到 $15.23 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 污染物浓度随水流增加显著, 表明各流速下管道污水中污染物浓度变化与管网中水流冲刷强度存在密切关系。

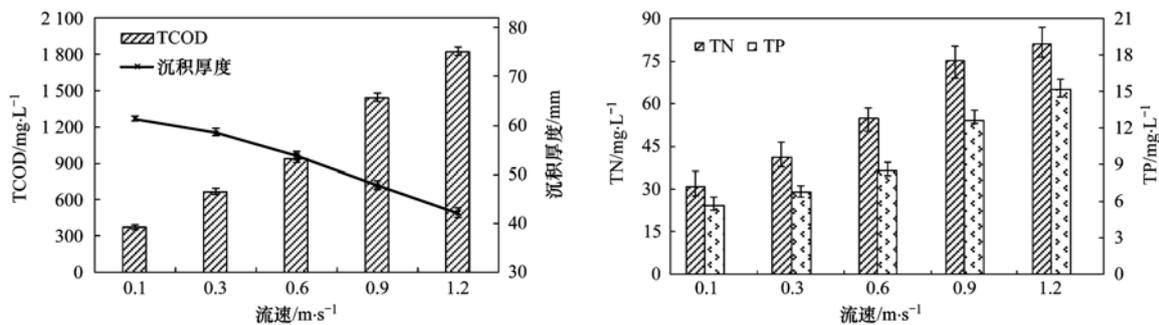


图 5 不同流速下管道污水中 TCOD、TN、TP 及沉积物厚度的变化

Fig. 5 Changes of COD, TN, TP and sediment thickness in pipeline sewage at different flow rates

而控制管道模拟系统水流流速由 $0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 增加到 $1.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 不同流速下模拟系统稳定运行 15 min 后, 沉积物厚度分别减小了 2.8、4.6、5.6、6.2、7.6 mm, 且随着各流速稳定时间的增加, 沉积物厚度持续减小, 尤其是流速大于 $0.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时表现得更为突出。

Ahyerre 等^[10] 根据管道沉积物的物化性质, 将其分为底层粗颗粒沉积物 (gross bed sediment, GBS)、有机层 (organic layer, OL) 和生物膜 (biofilm) 三类。由于底层沉积物具有很强抵抗力, 因此认为只有有机层及部分生物膜被冲起而释放污染物。随着管道流速的增加, 水流携带能力增强即冲刷强度增加, 污水中污染物颗粒发生迁移的几率大于污染物颗粒发生沉积的几率, 使污水中污染物的浓度升高, 沉积物厚度减小。

2.3 污水管道中污染物的赋存形态及流速对其冲刷性能的影响

不同流速下管道污水中 TCOD、TN、TP 在不同粒径段的分布特征如图 6 所示。可以看出, 各流速下管道污水中污染物的粒径分布^[23] 存在明显差异, 同时各粒径段 TCOD、TN、TP 的占比也随流速变化而产生较大差别。TCOD 主要分布在 $5 \sim 40 \mu\text{m}$ 和 $40 \sim 100 \mu\text{m}$ 粒径段, 其中 $40 \sim 100 \mu\text{m}$ 粒径段约占 50.16%, 由此可知管道中有机污染物易吸附在粒径较大的颗粒上; 李海燕等^[24] 研究表明, 污水中氮、磷主要以颗粒态存在, 而实验测得 TN、TP 的粒径主要分布在 $\leq 5 \mu\text{m}$ 的小颗粒污染物上, 约占 62.66% 和 58.38%, 因此可以推测管道中氮、磷易吸附在粒径较小的颗粒上。

以污水管道在设计充满度下最小设计流速 $0.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ^[25] 为划分点, 对不同流速下管道污水中 TCOD、TN、TP 的粒径变化进行分析。结果表明, 当流速小于 $0.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 污水中较大颗粒态污染物自然沉积, 且水流对沉积物的扰动与携带能力有限,

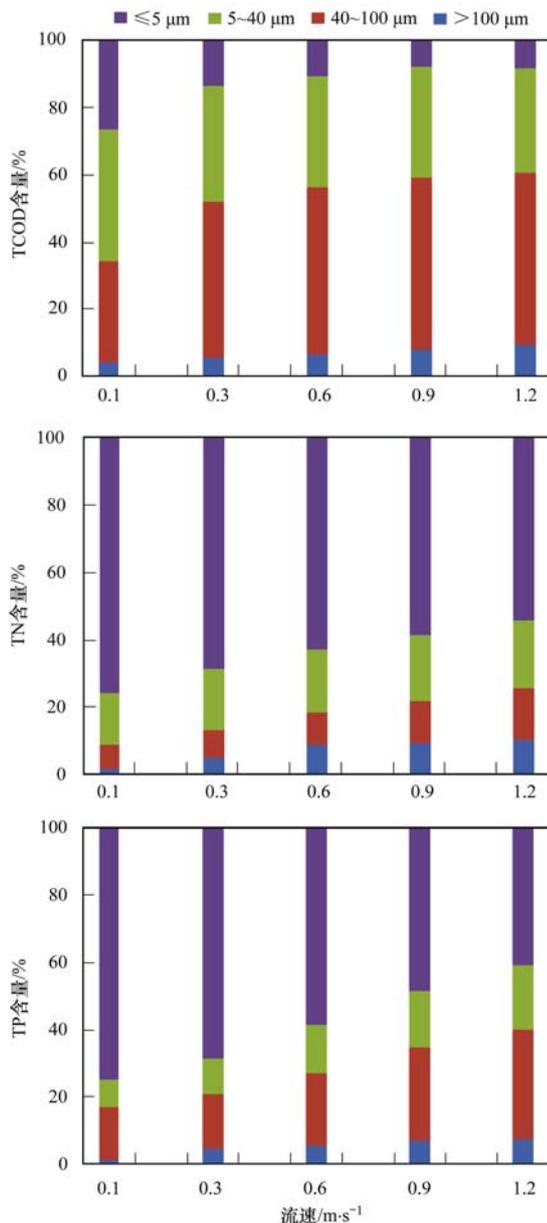


图6 TCOD、TN、TP 不同粒径段分布特征

Fig. 6 Distribution characteristics of TCOD, TN and TP in different particle size ranges

仅能冲刷携带走较小颗粒态污染物,造成污水中以小颗粒态污染物($0 \sim 40 \mu\text{m}$)为主,其中 TCOD 主要分布在 $5 \sim 40 \mu\text{m}$ 粒径段,约占 39.05%;当流速大于 $0.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,水流对沉积物的冲刷与携带能力较强,沉降下来的大颗粒态污染物再次被水流携带,造成污水中以大颗粒态污染物($\geq 40 \mu\text{m}$)为主,其中 TCOD 主要分布在 $40 \sim 100 \mu\text{m}$ 粒径段,约占 51.38%。即随着流速的增加,水流冲刷能力增强,以吸附或颗粒态形式沉积下来的有机污染物被冲刷严重,且随着冲刷强度的增大,污水中吸附在大颗粒上的有机污染物占比显著增加。当流速小于 0.6

$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, TN、TP 主要分布在 $0 \sim 5 \mu\text{m}$ 粒径段,约占 75.68% 和 74.60%,当流速大于 $0.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,污水中 TN、TP 仍然主要分布在 $0 \sim 5 \mu\text{m}$ 粒径段。由此可知,随着流速的增加,冲刷强度增大,大颗粒污染物被携带概率显著增加,碳类污染物浓度升高,且主要集中在粒径较大的污染物质上,同时由于管道中氮、磷主要吸附于小颗粒上,其受水流流速影响较小,基本处于悬浮状态,因此,当流速变化时,污水中氮、磷类污染物始终集中在较小的颗粒物质上。

2.4 城市污水管网冲刷与沉积规律及水质变化特性分析

城市污水管网输送污水过程中,管道内部环境复杂。其中,汇流、沉积、冲刷携带、微生物作用等会使水相、沉积相和气相之间发生着各种复杂的物理、化学及生物反应^[26]。因此,本实验建立了管道中污水水质变化过程,如图 7 所示。

城市污水管道中沉积物受不同强度水流冲刷,即缓流和急流条件下,污水中颗粒态污染物的运动轨迹不同。缓流条件下,管道沉积层沉积作用大于冲刷作用,污水中颗粒态污染物随水流悬浮一段距离后沉积下来,沉积物厚度增加且向水流方向推移;急流条件下,水流冲刷强度显著增加,污水中颗粒态污染物随水流一起运动到更远处,且水流会对沉积层进行冲刷携带,致使更多的颗粒态污染物再悬浮。由此可知,不同强度水流冲刷会引起管道污水中颗粒态污染物粒径分布和污染物浓度的显著变化,最终会对污水厂进水水质产生较大影响。

根据现有工艺对城市污水处理厂进水水质营养物质平衡的要求,污水的好氧处理,一般 $C:N:P = 100:5:1$;而污水的厌氧处理,对污水中 N、P 的含量要求低,一般 $C:N:P = 200:5:1$ 。在水流流速 $0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,污水中颗粒态污染物的中值粒径 D_{50} 为 $27.83 \mu\text{m}$, $C:N:P$ 约为 $100:8.38:1.54$;在水流流速 $0.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,污水中颗粒态污染物的中值粒径 D_{50} 为 $31.06 \mu\text{m}$, $C:N:P$ 约为 $100:6.24:1.03$;在水流流速为 $0.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,污水中颗粒态污染物的中值粒径 D_{50} 为 $36.87 \mu\text{m}$, $C:N:P$ 约为 $100:5.88:0.92$;在水流流速 $0.9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,污水中颗粒态污染物的中值粒径 D_{50} 为 $37.47 \mu\text{m}$, $C:N:P$ 约为 $100:5.25:0.88$ 。因此,随着水流流速的增加,污水中颗粒态污染物的中值粒径 D_{50} 增加,且 $C:N:P$ 比随之增加。即在缓流条件下,污水中颗粒态污染物物理沉积,而有机污染物主要存在于较大颗粒态污染物上,造成污水厂进水水质碳源不足;在急流条件下,管道沉积

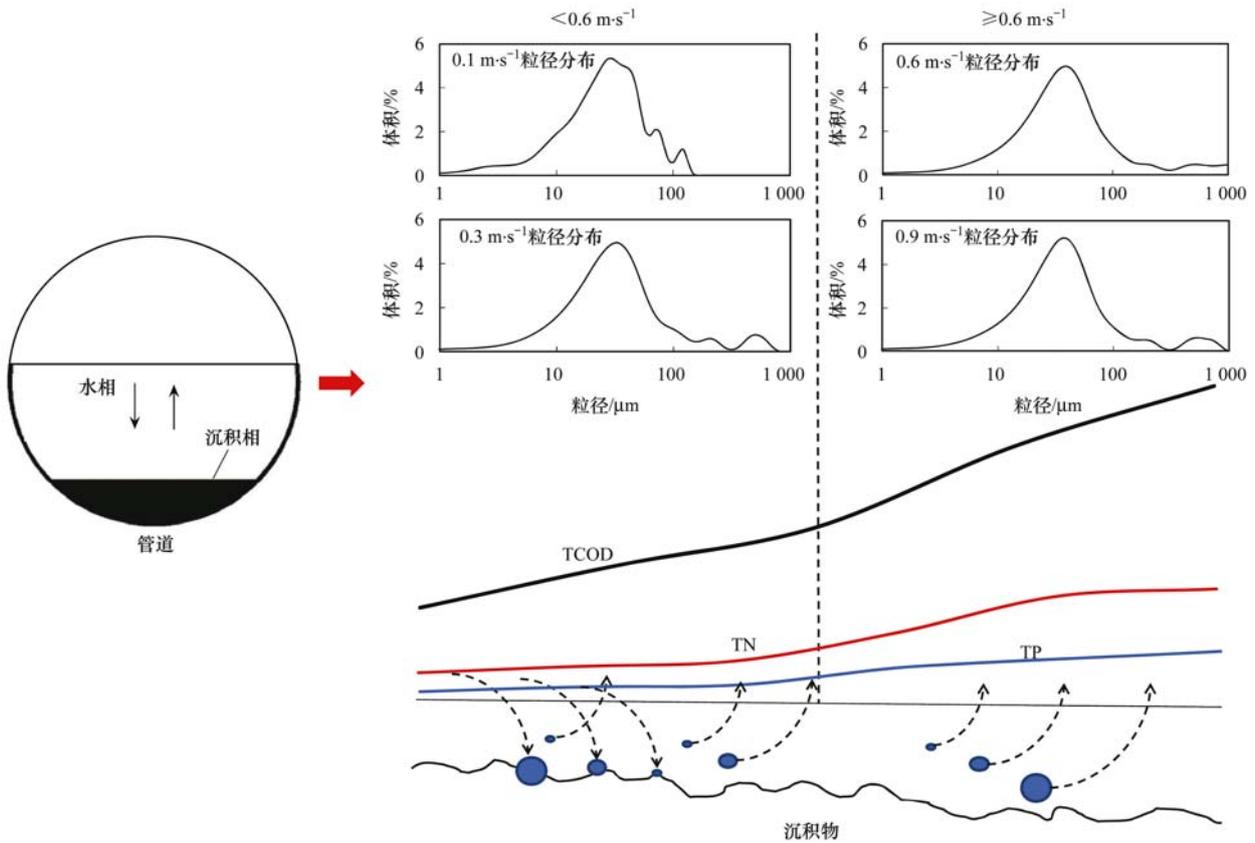


图7 管道中污水水质变化示意

Fig. 7 Change of sewage water quality in pipeline

物受水流冲刷严重,吸附有大量有机污染物的大颗粒沉积物被水流冲刷携带,使污水中碳源增加。

总之,污水在管网输送的过程中,污染物质不断地进行着迁移、转化。且每天排水高峰期,沉积物大量被冲刷携带,污水中碳类有机污染物的增加比重大于氮类和磷类污染物,使现有污水碳源不足得到改观,利于生物脱氮除磷工艺^[27,28]的碳源需求。

3 结论

(1)污水支管和干管沉积物厚度时变化较大,在排水高峰期时,流速逐渐增加,对管道沉积物造成冲刷显著,管道沉积物厚度减小;在排水低谷时,流速逐渐减小,污染物质较易沉积,管道沉积物厚度增加。污水主干管沉积物厚度时变化较小,管道内污染物颗粒沉积与沉积物冲刷水平维持相对平衡,管道沉积物厚度保持基本稳定。

(2)通过管道模拟装置研究了不同流速下污水中TCOD、TN、TP及沉积物厚度的变化规律,结果表明,随着管道流速的增加,水流携带能力增强即冲刷强度增大,污水中污染物的浓度升高,沉积物厚度减小。

(3)随着流速的增加,冲刷强度增大,污水中吸附在大颗粒上的有机污染物占比显著增加,而吸附在较小颗粒上的氮、磷类污染物占比减幅较小。

(4)通过城市污水管道水质变化过程分析,在流速小于 $0.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,吸附于大颗粒污染物上的碳类有机污染物沉积现象显著,造成污水厂进水水质碳源不足;在流速大于 $0.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,水流会对沉积层进行冲刷携带,冲刷作用大于沉积作用,沉积物厚度减小,且污水中碳类有机污染物的增加比重大于氮类和磷类污染物,利于改善现有污水碳源不足的缺陷。

参考文献:

- [1] 刘成,何耘,韦鹤平.城市排水管道泥沙问题浅析[J].给水排水,1999,25(12):7-13.
Liu C, He Y, Wei H P. Superficial analysis on sediment transport in city sewer[J]. Water & Wastewater Engineering, 1999, 25(12): 7-13.
- [2] 揣小明,杨柳燕,程书波,等.太湖和呼伦湖沉积物对磷的吸附特征及影响因素[J].环境科学,2014,35(3):951-957.
Chuai X M, Yang L Y, Cheng S B, et al. Characteristics and influencing factors of phosphorus adsorption on sediment in lake Taihu and lake Hulun[J]. Environmental Science, 2014, 35(3): 951-957.

- [3] 卢少勇, 远野, 金相灿, 等. 7 条环太湖河流沉积物氮含量沿程分布规律[J]. 环境科学, 2012, **33**(5): 1497-1502.
Lu S Y, Yuan Y, Jin X C, *et al.* Speciation distribution of nitrogen in sediments of 7 rivers around Taihu Lake [J]. Environmental Science, 2012, **33**(5): 1497-1502.
- [4] 褚君达, 徐惠慈. 河流底泥冲刷沉降对水质影响的研究[J]. 水利学报, 1994, (11): 42-47.
- [5] 高原, 王红武, 张善发, 等. 合流制排水管道沉积物及其模型研究进展[J]. 中国给水排水, 2010, **26**(2): 15-18, 27.
Gao Y, Wang H W, Zhang S F, *et al.* Current research progress in combined sewer sediments and their models[J]. China Water & Wastewater, 2010, **26**(2): 15-18, 27.
- [6] 李茂英, 李海燕. 城市排水管道中沉积物及其污染研究进展[J]. 给水排水, 2008, **34**(S1): 88-92.
Li M Y, Li H Y. Progress of sediment and its pollution in the urban sewer[J]. Water & Wastewater Engineering, 2008, **34**(S1): 88-92.
- [7] 程龙渊, 刘栓明, 肖俊法, 等. 三门峡库区水水泥沙实验研究[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1999.
- [8] Ashley R, Crabtree B, Fraser A, *et al.* European research into sewer sediments and associated pollutants and processes [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, **129**(4): 267-275.
- [9] Fan C Y. Sewer sediment and control a management practices reference guide[R]. Washington, DC: USEPA, 2004.
- [10] Ahyerre M, Chehbo G, Saad M. Sources and erosion of organic solids in a combined sewer [J]. Urban Water, 2001, **2**(4): 305-315.
- [11] 郭海泉. 西安市截流干管水质水量变化规律与解析[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2014. 44-47.
- [12] Bertrand-Krajewski J L, Bardin J P, Gibello C. Long term monitoring of sewer sediment accumulation and flushing experiments in a man-entry sewer [J]. Water Science & Technology, 2006, **54**(6-7): 109-117.
- [13] 蒋隽睿. 排水管道内沉积物沉积模拟与分析研究[J]. 中国市政工程, 2014, (2): 35-37.
Jiang J R. Simulation & analysis of sediment deposition in drain pipe[J]. China Municipal Engineering, 2014, (2): 35-37.
- [14] 郑兴灿, 李亚新. 污水除磷脱氮技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998.
- [15] 程慧. 西安市“十二五”城市污水全收集管网建设改造方案[R]. 西安: 市政府常务委员会, 2013.
- [16] 付博文, 金鹏康. 城市污水管道中污染物沉积特性研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2016. 25-29.
- [17] 石山. 西安市污水管网沉积物形成规律及影响因素研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015. 29-37.
- [18] 金鹏康, 金鑫, 王宝宝, 等. 一种城市污水管道沉积物取样设备[P]. 中国专利: 201210393212.1, 2013-02-20.
- [19] 闻德荪, 李兆年, 黄正华. 工程流体力学——上册(水力学)[M]. (第二版). 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [20] 夏星星, 冯良. 管道绝对当量粗糙度的取值及其影响分析[J]. 上海煤气, 2010, (2): 10-12.
Xia X X, Feng L. Analysis of the influence of absolute equivalent roughness[J]. Shanghai Gas, 2010, (2): 10-12.
- [21] 金鹏康, 郝晓宇, 王宝宝, 等. 城市污水管网中水质变化特性[J]. 环境工程学报, 2015, **9**(3): 1009-1014.
Jin P K, Hao X Y, Wang B B, *et al.* Characteristics of water quality variation in sewer networks [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, **9**(3): 1009-1014.
- [22] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [23] Sakrabani R, Vollertsen J, Ashley R M, *et al.* Biodegradability of organic matter associated with sewer sediments during first flush[J]. Science of the Total Environment, 2009, **407**(8): 2989-2995.
- [24] 李海燕, 李明怡, 崔爽. 流速对雨水管道中沉积物-水界面磷的释放及其释放速率的影响[J]. 环境化学, 2013, **32**(6): 1056-1061.
Li H Y, Li M Y, Cui S. The influence of flow rate on the amount and rate of phosphorus release at the sediment-water interface of rainwater pipes[J]. Environmental Chemistry, 2013, **32**(6): 1056-1061.
- [25] GB 50014-2006, 室外排水设计规范[S].
- [26] Warith M A, Kennedy K, Reitsma R. Use of sanitary sewers as wastewater pre-treatment systems [J]. Waste Management, 1998, **18**(4): 235-247.
- [27] Carucci A, Kühni M, Brun R, *et al.* Microbial competition for the organic substrates and its impact on EBPR systems under conditions of changing carbon feed [J]. Water Science and Technology, 1999, **39**(1): 75-85.
- [28] Henze M, Gujer W, Mino T, *et al.* Activated sludge model No. 2d, ASM2d[J]. Water Science and Technology, 1999, **39**(1): 165-182.

CONTENTS

Estimating the Secondary Organic Aerosol Concentration and Source Apportionment During the Summer and Winter in the Nanjing Industrial District	LIU Jing-da, AN Jun-lin, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (1733)
Modeled Deposition of Fine Particles in Human Airway in Northern Suburb of Nanjing	LIANG Jing-shu, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (1743)
Concentration Characteristics and Influencing Factors of Atmospheric Particulate Matters in Spring on Weizhou Island, Beihai, Guangxi Province	GAO Yuan-guan, ZHANG Kai, WANG Ti-jian, <i>et al.</i> (1753)
Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Atmosphere of Dajiuhe, Shennongjia, China	JIN Meng-yun, XING Xin-li, KE Yan-ping, <i>et al.</i> (1760)
Spatial Distribution Characteristics of NMHCs in Spring in Cangzhou City	DUAN Jing-chun, ZHOU Xue-ming, ZHANG He-feng, <i>et al.</i> (1769)
Emission Characteristics of Residential Coal Combustion Flue Gas in Beijing	LIANG Yun-ping, ZHANG Da-wei, LIN An-guo, <i>et al.</i> (1775)
Emission Characteristics and Ozone Formation Potential of VOCs from a Municipal Solid Waste Composting Plant	SHAO Zhu-ze, ZHENG Guo-di, WANG Yuan-gang, <i>et al.</i> (1783)
Degradation Characteristics of Composite CVOCs by Non-thermal Plasma	JIANG Li-ying, ZHANG Di, GUO Hai-qian, <i>et al.</i> (1792)
Chemical Compositions and Source Apportionment of Road Dust in Yuncheng	WU Yuan-yuan, LI Ru-mei, PENG Lin, <i>et al.</i> (1799)
Pollution Risk of Heavy Metals in Dust from the Building Along Elevated Road; A Case Study in Changzhou	YAO Jing-bo, WANG Ming-xin, QI Jin-di, <i>et al.</i> (1807)
Characteristics of Stable Isotope in Precipitation and Its Relationship with ENSO in Shanghai	DONG Xiao-fang, DENG Huang-yue, ZHANG Luan, <i>et al.</i> (1817)
Effects of DOC + CDPF on Emission Characteristics of Heavy-duty Diesel Vehicle	ZHANG Yun-hua, LOU Di-ming, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (1828)
Accumulated Health Risk Assessment of Arsenic in Drinking Water of Major Cities of China	ZHANG Qiu-qiu, PAN Shen-ling, LIU Wei, <i>et al.</i> (1835)
Health Risk Assessment of Microcystins from Drinking Water Source by Monte Carlo Simulation Method	WANG Yang, XU Ming-fang, GENG Meng-meng, <i>et al.</i> (1842)
Potential Risk and Distribution Characteristics of PPCPs in Surface Water and Sediment from Rivers and Lakes in Beijing, China	ZHANG Pan-wei, ZHOU Huai-dong, ZHAO Gao-feng, <i>et al.</i> (1852)
Assessment of the Spatial-temporal Distribution Characteristics and Main Affecting Factors of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Spring and Summer at the Changjiang Estuary and Adjacent Areas	SUN Yu-yan, BAI Ying, SU Rong-guo, <i>et al.</i> (1863)
Complexation Between Copper(II) and Colored Dissolved Organic Matter from Municipal Solid Waste Landfill	XIAO Xiao, HE Xiao-song, GAO Ru-tai, <i>et al.</i> (1873)
Effects of Three Bioretention Configurations on Dissolved Nitrogen Removal from Urban Stormwater	LI Li-qing, HU Nan, LIU Yu-qing, <i>et al.</i> (1881)
Influence of Spatial Pattern of Paddy Field on the Losses of Nitrogen and Phosphorus in Three Gorges Reservoir Area	CHEN Cheng-long, GAO Ming, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (1889)
Effects of NO ₃ ⁻ -N Loading on the Early-Period Efficiency of Denitrification and Carbon Releasing in Constructed Wetland Filled with Bark	JIANG Ying-be, LI Yao, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (1898)
Effects of Microbial Fuel Cell Coupled Constructed Wetland with Different Support Matrix and Cathode Areas on the Degradation of Azo Dye and Electricity Production	LI Xue-xiao, CHENG Si-chao, FANG Zhou, <i>et al.</i> (1904)
Effects of Anode Materials on Electricity Generation and Organic Wastewater Treatment of 6 L Microbial Fuel Cells	DING Wei-jun, YU Li-liang, CHEN Jie, <i>et al.</i> (1911)
Effects of Joint-reaction Combined by Ozonation and Coagulation on Aquatic Organic Matters	LIU Hai-long, FU Jing-miao, GUO Xue-feng, <i>et al.</i> (1918)
Disinfection Action of Ultraviolet Radiation and Chlorination on <i>Escherichia coli</i> and Poliovirus	XU Li-mei, ZHANG Chong-miao, WANG Xiao-chang, <i>et al.</i> (1928)
Adsorption of Phosphate from Aqueous Solution on Hydrous Zirconium Oxides Precipitated at Different pH Values	WANG Xing-xing, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (1936)
Performance of Polymer-based Titanium and Zirconium Oxides Composite Adsorbent for Simultaneous Removal of Phosphorus and Fluorine from Water	CHEN Jia-kai, NIE Guang-ze, LIU Zhi-ying, <i>et al.</i> (1947)
Effect of Different Adding Means of Ignited Water Purification Sludge on Phosphorus Adsorption and Forms	ZHU Pei-ying, LI Da-peng, YU Sheng-nan (1957)
Law of Pollutant Erosion and Deposition in Urban Sewage Network	SANG Lang-tao, SHI Xuan, ZHANG Tong, <i>et al.</i> (1965)
Fate of Eleven Phthalic Acid Esters in Aerobic Sewage Treatment System	ZHOU Lin-jun, GU Wen, LIU Ji-ning, <i>et al.</i> (1972)
Characteristics of Denitrification Inhibiting Sulfate Reducing Process	JIN Peng-kang, YANG Zhen-rui, LI Rong, <i>et al.</i> (1982)
Enhanced Short-cut Denitrification by Fe ⁽⁰⁾ -activated Carbon and Its Influencing Factors	LÜ Yong-tao, LIU Ting, ZENG Yu-lian, <i>et al.</i> (1991)
Comparison of Operating Performance of Partial Nitritation Systems with Two Different Inhibition Strategies	LI Hui-juan, PENG Dang-cong, CHEN Guo-yan, <i>et al.</i> (1997)
Effect of Substrate Ratio on Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX in ABR	LÜ Gang, XU Le-zhong, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (2006)
Effects of Temperature on the Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Removal and Microbial Community in SCSC-S/Fe	FAN Jun-hui, HAO Rui-xia, ZHU Xiao-xia, <i>et al.</i> (2012)
Analysis on Performance and Microbial Community Dynamics of a Strengthened Circulation Anaerobic Reactor Treating Municipal Wastewater	YANG Bo, XU Hui, FENG Xiu-ping, <i>et al.</i> (2021)
Aerobic Degradation Characteristics of the Quinoline-Degrading strain <i>Ochrobactrum</i> sp. and Its Bioaugmentation in Coking Wastewater	XU Wei-chao, WU Cui-ping, ZHANG Yu-xiu, <i>et al.</i> (2030)
Manganese Oxidation Characteristics and Oxidation Mechanism of a Manganese-Oxidizing Bacterium <i>Arthrobacter</i> sp. HW-16	WAN Wen-jie, XUE Zhi-jun, ZHANG Ze-wen, <i>et al.</i> (2036)
Effect of Temperature on Nitrogen Removal Performance of Marine Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria	ZHOU Tong, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (2044)
Nitrogen Removal Performance and Microbial Community Analysis of Activated Sludge Immobilization	XU Xiao-yi, YOU Xiao-lu, LÜ Chen-pei, <i>et al.</i> (2052)
Microbial Structure of an Enhanced Two-phase High-solid Anaerobic Digestion System Treating Sludge	CAO Zhi-ping, WU Jing, ZUO Jian-e, <i>et al.</i> (2059)
Comparative Studies on Soil Actinobacterial Biodiversity After Re-vegetation in the Urban and Rural Hydro-fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Region	QIN Hong, REN Qing-shui, YANG Wen-hang, <i>et al.</i> (2065)
Nitrous Oxide Emissions and Its Influencing Factors from an Agricultural Headwater Ditch During a Maize Season in the Hilly Area of Central Sichuan Basin	TIAN Lin-lin, ZHU Bo, WANG Tao, <i>et al.</i> (2074)
Effect of Dicyandiamide on N ₂ O Emission in Fallow Paddy Field and Rape Cropping	WU Yan-zheng, ZHANG Miao-miao, QIN Hong-ling, <i>et al.</i> (2084)
Characteristics of Biochar-mediated N ₂ O Emissions from Soils of Different Surface Conditions	ZOU Juan, HU Xue-yu, ZHANG Yang-yang, <i>et al.</i> (2093)
Characteristics of Soil Respiration and Soil Organic Carbon in Fava Bean Farmland Under Ridge Tillage and Straw Mulching in Southwest China	XIONG Ying, WANG Long-chang, DU Juan, <i>et al.</i> (2102)
Prediction of Distribution of Soil Cd Concentrations in Guangdong Province, China	SUN Hui, GUO Zhi-xing, GUO Ying, <i>et al.</i> (2111)
Spatial Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Suya Lake	ZHANG Peng-yan, KANG Guo-hua, PANG Bo, <i>et al.</i> (2125)
Effects of the Active Components of Humic Acids and Their Proportions on the Dynamics of Lead Transformation and Availability in Purple Alluvial Soil	WANG Qing-qing, JIANG Zhen-mao, WANG Jun, <i>et al.</i> (2136)
Enrichment Characteristics of Heavy Metals in Particulate Organic Matter of Purple Paddy Soil	LI Qiu-yan, ZHAO Xiu-lan (2146)
Enhanced Sorption of Cetrizine to Loessial Soil Amended with Biochar	WU Zhi-juan, BI Er-ping (2154)
Characteristics and Mechanism of Copper Adsorption from Aqueous Solutions on Biochar Produced from Sawdust and Apple Branch	WANG Tong-tong, MA Jiang-bo, QU Dong, <i>et al.</i> (2161)
Adsorption of Pb ²⁺ and Cd ²⁺ from Aqueous Solution Using Vermicompost Derived from Cow Manure and Its Biochar	DU Wen-hui, ZHU Wei-qin, PAN Xiao-hui, <i>et al.</i> (2172)
Performance and Mechanism Study of Visible Light-driven C ₃ N ₄ /BiOBr Composite Photocatalyst	BAO Yue, ZHOU Min-yun, ZOU Jun-hua, <i>et al.</i> (2182)