

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第12期

Vol.38 No.12

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(卷终)

京津冀区域 PM _{2.5} 污染相互输送特征	王燕丽, 薛文博, 雷宇, 王金南, 武卫玲 (4897)
顾及尺度效应的多源遥感数据“源”“汇”景观的大气霾效应	许凯, 余添添, 孙姣姣, 袁兆祥, 秦昆 (4905)
基于多源数据的 PM _{2.5} 浓度时空分布预测与制图	肖璐, 郎艺超, 夏浪, 楼昭涵, 孙楠, 黄李童, George Christakos (4913)
华东区域 PM _{2.5} 变化背景下浙江省人口经济暴露水平评估	郁珍艳, 高大伟, 李正泉, 杨续超, 王阔, 马浩, 徐宏辉 (4924)
南京北郊不同大气污染程度下气溶胶化学组分特征	张程, 于兴娜, 安俊琳, 朱彬, 林梦凡 (4932)
菏泽市 PM _{2.5} 碳组分季节变化特征	刘泽珺, 吴建会, 张裕芬, 梁丹妮, 马威, 刘保双, 冯银厂, 张勤勤 (4943)
辽宁典型城市道路扬尘 PM ₁₀ 、中水溶性无机离子组分特征及来源解析	张伟, 姬亚芹, 张军, 张蕾, 王伟, 王士宝 (4951)
天津冬季一次重污染过程颗粒物中水溶性离子粒径分布特征	姚青, 刘子锐, 韩素芹, 蔡子颖, 刘敬乐, 黄小娟, 刘景云, 王跃思 (4958)
高原城市昆明公路隧道大气中 PM _{2.5} 理化特征分析	王成辉, 闫琨, 韩新宇, 施择, 毕丽玫, 向峰, 宁平, 史建武 (4968)
2015 年中国近地面臭氧浓度特征分析	段晓瞳, 曹念文, 王潇, 张玉欣, 梁静舒, 杨思鹏, 宋秀瑜 (4976)
不同 CDPF 贵金属负载量对柴油公交车 VOCs 组分排放影响	楼狄明, 张子骏, 刘继凯, 谭丕强, 胡志远 (4983)
ENSO 事件对上海降水中氢氧同位素变化的影响	董小芳, 杨华玮, 张杰, 朱志鹏, 杨言, 郑祥民, 周立旻 (4991)
我国南方两个典型森林生态系统的硫、氮和汞沉降量	程正霖, 罗遥, 张婷, 段雷 (5004)
新安江水库二氧化碳排放的时空变化特征	杨乐, 李贺鹏, 孙滨峰, 岳春雷 (5012)
三峡库区表层沉积物营养盐时空变化及评价	卓海华, 邱光胜, 翟婉盈, 刘云兵, 兰静 (5020)
三门峡水库水体中不同形态汞的分布特征	程柳, 麻冰涓, 周伟立, 王力, 耿音, 刘清伟, 毛宇翔 (5032)
太子河流域中游地区河流硝酸盐来源及迁移转化过程	李艳利, 孙伟, 杨梓睿 (5039)
典型入湖河流水体氮素变化特征及其对降雨的响应: 以太湖乌溪港为例	连慧妹, 刘宏斌, 李旭东, 宋挺, 刘申, 雷秋良, 任天志, 武淑霞, 李影 (5047)
缙云山常绿阔叶林湿沉降过程中不同空间层次水质变化特征	马明, 孙涛, 李定凯, 王定勇 (5056)
基于 MIKE11 模型提高污染河流水质改善效果的方法	熊鸿斌, 陈雪, 张斯思 (5063)
北京市地下水典型抗生素分布特征与潜在风险	陈卫平, 彭程伟, 杨阳, 吴玉梅 (5074)
深圳茅洲河下游柱状沉积物中碳氮同位素特征	凌郡鸿, 张依章, 王民浩, 周北海, 陶明, 陈惠明, 闫振广 (5081)
供水管网铁释放的影响因素相对重要性分析	刘莹, 于影, 石宝友, 刘书明, 吴雪 (5090)
低温高铁锰氨氮地下水生物同池净化	李冬, 曹瑞华, 杨航, 王刘煜, 张杰, 曾辉平 (5097)
臭氧预氧化强化混凝对二级出水中 DON 作用机制探讨	刘冰, 郑煜铭, 王大祥, 李清飞, 赵承美, 余国忠, 古励 (5106)
碱活化过一硫酸盐降解水中环丙沙星	葛勇建, 蔡显威, 林翰, 徐梦苑, 沈一挺, 周丹, 钱梦洁, 邓靖 (5116)
MIL-88A@MIP 催化活化过硫酸盐靶向降解邻苯二甲酸二丁酯	王九妹, 关泽宇, 万金泉, 王艳, 马邕文, 闫志成, 张桂华 (5124)
常温下加装脱硫装置的 MCBMBR 处理高硫酸盐有机废水试验	徐婷, 金艳青, 李勇 (5132)
载镁天然沸石复合材料对污水中氮磷的同步回收	成雪君, 王学江, 王浩, 张志昊, 赵建夫 (5139)
不同运行模式下改良型 CAST 工艺处理生活污水的除磷性能	马娟, 王谨, 俞小军, 周猛, 孙洪伟, 王磊 (5146)
ABR-MBR 工艺处理生活污水实现短程硝化	吕亮, 赵诗惠, 韦佳敏, 张敏, 尤雯, 吴鹏, 沈耀良 (5154)
海洋厌氧氨氧化菌处理含海水污水的基质抑制及其动力学特性	周同, 于德爽, 李津, 吴国栋, 王晓静 (5162)
游离氨 (FA) 对氨氧化过程氨逃逸影响试验	孙洪伟, 于雪, 尤永军, 彭永臻, 王淑莹 (5169)
西安市典型景观水体水质及反硝化细菌种群结构	康鹏亮, 黄廷林, 张海涵, 陈胜男, 商潘路, 冯稷, 贾宽宇 (5174)
厌氧氨氧化启动过程及微生物群落结构特征	汪瑶琪, 张敏, 姜滢, 徐乐中, 陈重军, 沈耀良 (5184)
SBAF 单级自养脱氮快速启动、稳定运行及微生物群落演化	岳秀, 刘竹寒, 于广平, 吉世明, 唐嘉丽 (5192)
活性污泥中硝化螺菌 (Nitrospira) 的富集及其动力学参数	姚倩, 彭党聪, 赵俏迪, 王博 (5201)
pH 值对零价铁自养反硝化过程的影响	张宁博, 李祥, 黄勇 (5208)
接种单一/混合污泥对厌氧氨氧化反应器快速启动的影响	张泽文, 李冬, 张杰, 郭跃洲, 李帅 (5215)
活性污泥法和生物膜法 SBR 工艺亚硝化启动和稳定运行性能对比	孙艺齐, 卞伟, 王盟, 赵青, 王文啸, 梁东博, 李军 (5222)
长期暴露下纳米 TiO ₂ 对厌氧颗粒污泥体系稳定性的影响	李慧婷, 崔福义 (5229)
长三角典型城郊不同土地利用土壤抗生素组成及分布特征	赵方凯, 陈利顶, 杨磊, 方力, 孙龙, 李守娟 (5237)
不同有机肥中磷在土壤剖面中累积迁移特征与有效性差异	张田, 许浩, 茹淑华, 苏德纯 (5247)
有机磷酸酯在三峡库区土壤中污染特征	何明靖, 杨婷, 杨志豪, 魏世强 (5256)
上海某生活垃圾焚烧厂周边土壤重金属污染特征、来源分析及潜在生态风险评价	郭彦海, 孙许超, 张士兵, 余广杰, 唐正, 刘振涛, 薛昱, 高品 (5262)
大庆市不同环境介质中多环芳烃污染特征对比及来源解析	宋宁宁, 冯嘉申, 于洋, 李迎霞 (5272)
工业区户外儿童游乐场地表灰尘重金属污染的磁学响应	杨孟, 李慧明, 李凤英, 王金花, 刁一伟, 钱新, 杨兆平, 王成 (5282)
上海市郊工业区附近蔬菜中重金属分布及其健康风险	周雅, 毕春娟, 周泉潇, 张焕焕, 陈振楼, 包新一 (5292)
基施硅肥对土壤微生物有效性及水稻镉累积效应的影响	高子翔, 周航, 杨文弢, 辜娇峰, 陈立伟, 杜文琪, 徐珺, 廖柏寒 (5299)
水稻对气态单质汞的吸收与挥发	尚帅, 田珮, 蒋煜, 武婧轩, 姜珊, 邓泓 (5308)
麦田 O ₃ 浓度的长期变化及其对冬小麦干物质和产量损失的估算	赵辉, 郑有飞, 李硕, 徐静馨, 曹嘉晨, 魏莉, 关清 (5315)
缓控释肥侧深施对稻田氨挥发排放的控制效果	侯朋福, 薛利祥, 俞映惊, 薛利红, 范立慧, 杨林章 (5326)
生物炭和有机肥对华北农田盐碱土 N ₂ O 排放的影响	石玉龙, 刘杏认, 高佩玲, 张晴雯, 张爱平, 杨正礼 (5333)
成都平原不同类型沟渠 CO ₂ 、CH ₄ 和 N ₂ O 排放通量特征及其影响因素	冯香荣, 邓欧平, 邓良基, 吴铭, 姚昆, 杨泽鹏 (5344)
河流 CO ₂ 与 CH ₄ 排放研究进展	王晓峰, 袁兴中, 陈槐, 何奕忻, 罗珍, 刘恋, 何宗茂 (5352)
《环境科学》第 38 卷 (2017 年) 总目录	(5367)
《环境科学》征稿简则 (4950) 《环境科学》征订启事 (5031) 信息 (4923, 5105, 5161)	

供水管网铁释放的影响因素相对重要性分析

刘莹¹, 于影^{2,3}, 石宝友^{2,3*}, 刘书明^{1*}, 吴雪¹

(1. 清华大学环境学院, 饮用水安全教研所, 北京 100084; 2. 中国科学院生态环境研究中心, 饮用水科学与技术重点实验室, 北京 100085; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 供水管网的铁释放问题近年来日益受到关注. 影响供水管网铁释放的因素众多, 本研究选取了 pH、溶解氧(DO)、碱度(Alk)、硬度、氯离子(Cl^-)、硫酸根(SO_4^{2-})、温度(T)和水力停留时间(HRT)这8个影响因素, 利用逐步回归和偏相关分析, 建立了铁释放的非线性幂指数模型, 并用标准化回归系数和偏相关系数比较了这些因素的相对重要性. 结果表明, 铁释放模型拟合效果良好; 用标准化回归系数衡量影响因素相对重要性时, SO_4^{2-} 、HRT、 Cl^- 和 T 是相对重要的因素, 相对重要性排序为 $\text{SO}_4^{2-} \approx \text{HRT} > \text{Cl}^- > T$; 用偏相关系数衡量时, HRT、 SO_4^{2-} 、Alk、 Cl^- 和 T 是相对重要的因素, 排序为 $\text{HRT} > \text{SO}_4^{2-} > \text{Alk} > \text{Cl}^- > T$. 综合两种系数的分析结果, HRT、 SO_4^{2-} 和 Cl^- 是本研究条件下相对重要的因素, T 和Alk的相对重要性视实际情况变动.

关键词: 供水管网; 铁释放; 逐步回归; 标准化回归系数; 偏相关系数

中图分类号: X131.2; TU991.33 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)12-5090-07 DOI: 10.13227/j.hj.kx.201703249

Relative Importance of Factors Influencing Iron Release in Drinking Water Distribution Systems

LIU Ying¹, YU Ying^{2,3}, SHI Bao-you^{2,3*}, LIU Shu-ming^{1*}, WU Xue¹

(1. Division of Drinking Water Safety, School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Key Laboratory of Drinking Water Science and Technology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Iron release in drinking water distribution systems (DWDSs) has attracted significant attention in recent years. There are many factors influencing iron release in DWDSs. In this study, we select pH, dissolved oxygen (DO), alkalinity (Alk), hardness, chloride (Cl^-), sulfate (SO_4^{2-}), temperature (T), and hydraulic retention time (HRT) as factors to investigate. Stepwise regression and partial correlation analysis are used as methods for establishing nonlinear power exponent iron release models and determining the relative importance of these factors by comparing standardized regression coefficients and partial correlation coefficients. The results show that the iron release models fit well. The important factors are SO_4^{2-} , HRT, Cl^- , and T , and the relative importance of the effect of the factors on iron release is $\text{SO}_4^{2-} \approx \text{HRT} > \text{Cl}^- > T$, when measured by standardized regression coefficients; whereas, the important factors are HRT, SO_4^{2-} , Alk, Cl^- , and T , and the order of importance is $\text{HRT} > \text{SO}_4^{2-} > \text{Alk} > \text{Cl}^- > T$, when measured by partial correlation coefficients. Combining these two results, we conclude HRT, SO_4^{2-} , and Cl^- are the most important factors affecting iron release in pipes for the conditions in this study. The relative importance of T and Alk changes depending on the actual situation.

Key words: drinking water distribution system; iron release; stepwise regression; standardized regression coefficient; partial correlation coefficient

保障饮用水水质安全一直是供水行业关注的重点. 我国的供水管网管材中铸铁管仍大量存在, 比例超过40%^[1]. 铸铁管使用年限较长、出现管道腐蚀后, 若管网水质、水力条件突然改变, 容易出现“黄水”问题, 即管道材质腐蚀产生的铁氧化物释放到水中, 引起水质恶化. 供水管网的铁释放不仅会导致管网水出现色度、浊度、异臭味等感官问题, 引起用户抱怨, 伴随释放的微生物和重金属等污染物还可能危害人体健康. 近年来, 区域性的水资源短缺问题日渐突出. 为解决北方地区的水资源短缺现状, 远距离的调水工程逐渐推进. 研究表明, 水源切换时, 新切换水源与原水源的水质差异

可能导致管道管垢与原水源形成的平衡被破坏, 出现铁释放突然升高的问题. 例如, 1992年美国亚利桑那州图桑市供水水源由地下水切换为地表水后, 出现了较大规模的“黄水”现象^[2]; 2008年10月初, 同样由于水源切换, 北京部分地区出现“黄水”问题^[3]. 影响铁释放的因素众多, 包括水质理化指标、水力条件、管道管垢构成以及温度等环境因

收稿日期: 2017-03-28; 修订日期: 2017-07-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(51378493, 51678558)

作者简介: 刘莹(1993~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为供水管网水质保障、能耗, E-mail: ying-liu15@mails.tsinghua.edu.cn

* 通信作者, E-mail: byshi@rcees.ac.cn; shumingliu@tsinghua.edu.cn

素. 已有很多研究对这些因素如何影响铁释放进行了实验探究, 也有很多研究用多元回归、人工神经网络、遗传算法或反应动力学、热力学平衡等方法, 建立了铁释放的模型, 研究铁释放的规律^[4~12]. 但少有文献定量衡量影响铁释放的各个因素的重要性高低. 本研究将用统计学的方法, 运用逐步回归和偏相关分析, 定量衡量铁释放影响因素的相对重要性, 并给出各影响因素的重要性排序, 以为管网铁释放问题的控制提供参考.

1 材料与方法

Imran 等^[8]在 2005 年提出了铁释放的经验统计模型, 以色度的变化(ΔC)表征铁释放量, 建立了非线性幂指数模型:

$$\Delta C = \frac{[Cl^-]^{0.485} [Na^+]^{0.561} [SO_4^{2-}]^{0.118} DO^{0.967} T^{0.813} HRT^{0.836}}{10^{1.321} Alk^{0.912}} \quad (1)$$

之后, 有许多研究建立了与此相似的模型, 并取得了较好的效果^[13~15].

本研究采用此非线性幂指数模型形式, 取铁释放量(ΔFe , $mg \cdot L^{-1}$)为因变量, 结合文献调研结果及数据的完整程度, 选取 pH、溶解氧(DO)、碱度(Alk)、总硬度/钙硬度(Hardness)、氯离子(Cl^-)、硫酸根(SO_4^{2-})、温度(T)、水力停留时间(HRT)这 8 个影响因素为自变量. 模型为:

$$\Delta Fe = k \cdot pH^{a_1} \cdot DO^{a_2} \cdot Alk^{a_3} \cdot Hardness^{a_4} \cdot [Cl^-]^{a_5} \cdot [SO_4^{2-}]^{a_6} \cdot T^{a_7} \cdot HRT^{a_8} \quad (2)$$

两边取对数:

$$\lg \Delta Fe = \lg k + a_1 \lg pH + a_2 \lg DO + a_3 \lg Alk + a_4 \lg Hardness + a_5 \lg [Cl^-] + a_6 \lg [SO_4^{2-}] + a_7 \lg T + a_8 \lg HRT \quad (3)$$

则铁释放量与其影响因素的关系可从非线性转化为对数值的线性关系, 进而进行逐步回归和偏相关分析, 得到标准化回归系数(标准化系数)和偏相关系数, 比较这 8 个因素的相对重要性.

1.1 实验情况简介

本实验管道取自北方某市管网的 6 个地点(编号为 1~6 号), 均为无内衬铸铁管. 管道挖取后运送至位于湖北省丹江口市的中试基地, 并分别搭建成中试模拟系统, 均以丹江口某水厂出厂水作为系统的实验用水.

1、2 号管道的中试模拟系统探究了水源切换、 SO_4^{2-} 和 Cl^- 浓度、不同消毒剂和 DO 浓度、进水碱度和 pH 对系统铁释放的影响. 实验从 2012 年 3 月持续到 2014 年 1 月, 历时近两年, 实验装置和运行方法参见文献^[11,12,16]. 3~6 号管道的中试模拟系统探究了水源切换、拉森指数、进水碱度、碳酸钙沉淀势对系统铁释放的影响, 实验从 2014 年 3 月持续到 2015 年 1 月, 历时近一年, 实验装置和运行方式参见文献^[10,17].

各管道实验数据的描述性统计见表 1.

表 1 各管道实验数据描述性统计¹⁾

Table 1 Descriptive statistics of each pipe's experimental data

管道编号	描述性统计量	pH	DO /mg·L ⁻¹	Alk /mg·L ⁻¹	Hardness /mg·L ⁻¹	Cl ⁻ /mg·L ⁻¹	SO ₄ ²⁻ /mg·L ⁻¹	T/℃	HRT /h	原通水源
1、2	最小值	7.52	7.38	76	103	1.6	21	7.7	8	地下水
	最大值	9.12	21.56	255	158	163.4	298	27.8	8	
	均值	8.19	10.19	120	129	15.6	184	18.9	8	
	标准差	0.37	3.12	37	14	35.3	80.9	6.5	0	
	记录数	315								
3~6	最小值	5.90	7.45	88	87	2.9	16	10.3	2	3、4 号为地下水， 5 号为地表水， 6 号为混合水
	最大值	9.12	11.54	664	431	239.8	314	25.8	24	
	均值	8.14	9.32	141	123	22.7	35	18.3	20	
	标准差	0.44	0.93	80	59	58.8	53.7	3.9	7.6	
	记录数	241								

1) 1、2 和 3~6 号管道分别在相同进水、同样的实验条件下进行实验, 故描述性统计量相同; Alk(碱度, 以 $CaCO_3$ 计); Hardness(硬度), 1、2 号管道为总硬度, 3~6 号为钙硬度, 均以 $CaCO_3$ 计; 1、2 号管道实验中, HRT 固定为 8 h

1.2 逐步回归及标准化回归系数

逐步回归在普通的回归法基础上增加了对自变量的筛选, 先对每个自变量和因变量建立一元简单线性回归模型, 将其中 P 值最小且有统计学意义的

简单线性回归模型对应的自变量引入模型, 然后检验已引入模型的自变量是否仍有统计学意义, 有则保留在模型中, 没有则剔除出模型; 对剩余的自变量重复前面的操作, 直到模型内的自变量均显著,

模型外的自变量均不显著^[18]。

由于各自变量的单位不同, 回归模型得到的偏回归系数有不同的量纲, 只能用于解释自变量对因变量的作用, 无法比较自变量的相对重要性. 为排除单位的影响, 对变量值进行标准化变换, 标准化后的数据没有单位, 得到的标准化系数也没有单位, 可用于比较各自变量对因变量的相对重要性^[19]。

设回归方程为:

$$Y = k + a_1 X_1 + a_2 X_2 + \cdots + a_n X_n \quad (4)$$

式中, Y 为因变量; X_i 为自变量; a_i 为偏回归系数; $i = 1, 2, \cdots, n$.

变量标准化:

$$Y' = \frac{Y - \mu_Y}{\sigma_Y} \quad (5)$$

$$X'_i = \frac{X_i - \mu_{X_i}}{\sigma_{X_i}} \quad (6)$$

式中, Y' 、 X'_i 为标准化后的变量值; μ_Y 、 μ_{X_i} 为变量的均值; σ_Y 、 σ_{X_i} 为变量的标准差。

标准化系数 a'_i 与原偏回归系数 a_i 的关系为:

$$a'_i = a_i \frac{\sigma_{X_i}}{\sigma_Y} \quad (7)$$

标准化系数可以体现自变量的相对重要性, 但从公式(7)可以看出, 数据本身的波动程度会影响对重要性的判断. 在某一特定模型中, 如果某自变量的波动程度较大, 这一自变量就会显得较为重要. 因此通过比较标准化系数绝对值大小得出的变量重要性只适用于当前情况, 或可作短期外推, 若自变量波动程度有变化, 相对重要性可能也会产生变化^[19]。

1.3 偏相关分析与偏相关系数

很多情况下, 变量不是独立的, 会有相关关系. 简单相关分析在考察两变量间的关系时, 没有考虑其他变量的影响. 偏相关分析是在控制其他变量的线性影响的条件下, 分析两个变量间的线性相关性, 得到偏相关系数^[18]. 某一自变量对应的标准化系数可用于衡量该自变量对因变量的影响, 但无法排除其他自变量与该自变量有关联从而对因变量产生间接影响. 偏相关系数则扣除了其他变量的影响, 重新考察两个变量的相关关系. 偏相关系数没有单位, 取值在 $-1 \sim +1$ 之间, 绝对值越大, 偏相关程度越大。

可通过简单相关系数计算偏相关系数:

$$r_{12(3)} = \frac{r_{12} - r_{13} \times r_{23}}{\sqrt{1 - r_{13}^2} \times \sqrt{1 - r_{23}^2}} \quad (8)$$

$$r_{12(34)} = \frac{r_{12(3)} - r_{14(3)} \times r_{24(3)}}{\sqrt{1 - r_{14(3)}^2} \times \sqrt{1 - r_{24(3)}^2}} \quad (9)$$

.....

$$r_{12(34 \cdots n)} = \frac{r_{12(34 \cdots n-1)} - r_{1n(34 \cdots n-1)} \times r_{2n(34 \cdots n-1)}}{\sqrt{1 - r_{1n(34 \cdots n-1)}^2} \times \sqrt{1 - r_{2n(34 \cdots n-1)}^2}} \quad (10)$$

式中, r_{12} 、 r_{13} 、 r_{23} 为两变量的简单相关系数, 例如 r_{12} 为第一个和第二个变量的简单相关系数; $r_{12(34)}$ 、 $r_{12(3)}$ 、 $r_{14(3)}$ 、 $r_{24(3)}$ 、 $r_{12(34 \cdots n)}$ 、 $r_{12(34 \cdots n-1)}$ 、 $r_{1n(34 \cdots n-1)}$ 、 $r_{2n(34 \cdots n-1)}$ 为当控制变量为括号内的变量时, 两变量的偏相关系数, 例如 $r_{12(34)}$ 为当控制变量为第三个和第四个变量时, 第一个和第二个变量的偏相关系数。

本研究使用软件 IBM SPSS Statistics 19 进行逐步回归和偏相关分析, 选取的显著性水平为 0.05。

2 结果与讨论

2.1 逐步回归模型及标准化回归系数衡量影响因素相对重要性

2.1.1 逐步回归铁释放模型

根据逐步回归的偏回归系数, 将各管道的铁释放模型列于表 2。

各管道的拟合结果均较好, 4、5 号管道的铁释放模型 $R^2 > 0.8$, 拟合效果非常好, 除 2 号外, 其他组 R^2 值均达到了 0.65 以上, 说明铁释放量的非线性幂指数模型的形式对于不同的管道均能达到较好的拟合效果. 但同时也可以发现, 各管道的铁释放模型保留的显著变量及其系数不尽相同. 碱度和 Cl^- 在 6 段管道的铁释放模型中均显著; pH 和 SO_4^{2-} 在 5 段管道的模型中显著; DO 和 T 在 4 段管道的模型中显著; 1、2 号管道的 HRT 为常数, 故在 HRT 可以作为变量的 3~6 号管道中, HRT 在 3 段管道的模型中显著; 总硬度均显著(1、2 号管道), 钙硬度均不显著(3~6 号管道). 事实上, 目前并没有发现具有普适性的铁释放模型, 大部分研究都是针对一段管道的实验数据建立模型, 对于其他管道的适用性不明^[20]. 供水管网的铁释放涉及了众多影响因素, 而在建立模型时仅能包含部分变量, 许多因素难以在模型中定量体现, 这也是造成目前没有统一的铁释放模型的原因之一。

2.1.2 标准化系数衡量影响因素相对重要性

为比较各因素的相对重要性, 将各管道的铁释放模型标准化回归系数列于表 3。

表 2 各管道的铁释放模型

Table 2 Each pipe's iron release model

管道编号	铁释放模型	R ²
1	$\Delta\text{Fe} = \frac{10^{-2.662} \text{pH}^{0.946} \text{Hardness}^{0.981} [\text{Cl}^-]^{0.199} [\text{SO}_4^{2-}]^{0.482}}{\text{Alk}^{0.948}}$	0.657
2	$\Delta\text{Fe} = \frac{10^{-0.048} \text{Hardness}^{1.176} [\text{Cl}^-]^{0.179} [\text{SO}_4^{2-}]^{0.355}}{\text{pH}^{2.835} \text{DO}^{0.472} \text{Alk}^{0.473}}$	0.565
3	$\Delta\text{Fe} = \frac{10^{-13.140} \text{DO}^{9.616} [\text{Cl}^-]^{0.208} T^{5.771} \text{HRT}^{0.810}}{\text{pH}^{4.402} \text{Alk}^{0.575}}$	0.762
4	$\Delta\text{Fe} = \frac{10^{-8.583} \text{DO}^{5.346} [\text{Cl}^-]^{0.200} [\text{SO}_4^{2-}]^{0.154} T^{3.323} \text{HRT}^{1.289}}{\text{pH}^{2.892} \text{Alk}^{0.183}}$	0.848
5	$\Delta\text{Fe} = \frac{10^{-0.441} [\text{Cl}^-]^{0.260} [\text{SO}_4^{2-}]^{0.353} T^{0.508} \text{HRT}^{0.566}}{\text{pH}^{0.992} \text{Alk}^{0.493}}$	0.825
6	$\Delta\text{Fe} = \frac{10^{3.934} [\text{Cl}^-]^{0.298} [\text{SO}_4^{2-}]^{0.510}}{\text{DO}^{3.072} \text{Alk}^{0.744} T^{0.867}}$	0.675

表 3 各管道铁释放模型的标准化回归系数¹⁾

Table 3 Standardized regression coefficients of each pipe's iron release model

管道编号	pH	DO	Alk	Hardness	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	T	HRT
1	0.092	—	-0.522	0.226	0.499	0.929	—	—
2	-0.368	-0.350	-0.345	0.360	0.597	0.909	—	—
3	-0.219	0.862	-0.188	—	0.205	—	1.131	0.495
4	-0.138	0.461	-0.057	—	0.190	0.070	0.626	0.746
5	-0.081	—	-0.263	—	0.419	0.271	0.164	0.569
6	—	-0.467	-0.411	—	0.496	0.404	-0.288	—

1) “—”表示该项不在逐步回归模型中

许多研究表明，pH 增大，铁释放被抑制；DO 对铁释放的影响比较复杂，在一定范围内抑制铁释放，但超出某临界值则起促进作用；碱度升高抑制铁释放；硬度与铁释放的相关性比较复杂，有时呈正相关，有时呈负相关；Cl⁻、SO₄²⁻ 都会促进铁释放；温度变化会影响许多水质特性，例如 pH、DO、化学反应平衡和微生物活动等，而这些都会影响铁释放，总体而言温度升高促进铁释放；HRT 的延长会导致铁释放量增加^[6,15,21~27]。

从表 3 可以看出，Cl⁻、SO₄²⁻ 对应的标准化系数均为正，与铁释放量正相关，浓度增大促进铁释放，与理论相符；Alk 对应的标准化系数为负，即与铁释放量负相关，增大碱度可抑制铁释放，也与理论相符。而 Cl⁻、SO₄²⁻ 和 Alk 刚好也是拉森指数（Larson ratio, $\text{LR} = \frac{2[\text{SO}_4^{2-}] + [\text{Cl}^-]}{[\text{HCO}_3^-]}$ ）中的因素，这也印证了用拉森指数判断水的化学稳定性具有一定的可靠性。除 1 号管道 pH 对应的标准化系数为正且接近零外，2~5 号管道的 pH 对应的标准化系数均为负，pH 增大抑制铁释放。HRT 的标准

化系数均为正，与铁释放正相关。这两项也与理论相符。Hardness 对应的系数太少，不足以做出准确的判断。DO 和 T 对应的标准化系数均有正有负，前面提到 DO 和 T 对铁释放的影响很复杂，这可能是造成它们的系数正负均出现的原因。总体而言，各影响因素的标准化系数的正负性与理论基本相符。

将表 3 中的标准化系数按照绝对值大小排序比较各影响因素的相对重要性。

- 1 号：SO₄²⁻ > Alk > Cl⁻ > Hardness > pH
- 2 号：SO₄²⁻ > Cl⁻ > pH > Hardness > DO > Alk
- 3 号：T > DO > HRT > pH > Cl⁻ > Alk
- 4 号：HRT > T > DO > Cl⁻ > pH > SO₄²⁻ > Alk
- 5 号：HRT > Cl⁻ > SO₄²⁻ > Alk > T > pH
- 6 号：Cl⁻ > DO > Alk > SO₄²⁻ > T

对于不同的管道，各影响因素的相对重要性排序明显不同。即使 1~2、3~6 号管道的进水和实验条件分别相同，它们的影响因素相对重要性排序也不同。这说明管道本身的属性也是影响铁释放的重要因素。

本研究共 8 个影响因素,而每段管道模型中显著的因素有 5~7 个.在排名前四的影响因素中,这 8 个因素均出现过;在排名前三的因素中,除硬度外的 7 个因素出现过;在排名前两位的因素中,除 pH 和硬度外的 6 个因素均出现过,其中 Cl^- 出现过 3 次, SO_4^{2-} 、HRT、 T 和 DO 各出现 2 次,碱度出现

1 次; SO_4^{2-} 、HRT、 T 和 Cl^- 出现在第一位.综合出现位次和次数,用标准化系数分析,本研究认为 SO_4^{2-} 、HRT、 Cl^- 和 T 是相对更重要的因素,且排序为 $\text{SO}_4^{2-} \approx \text{HRT} > \text{Cl}^- > T$.

2.2 偏相关系数衡量影响因素相对重要性

将偏相关分析得到的偏相关系数列于表 4.

表 4 各影响因素与铁释放量的偏相关系数¹⁾

Table 4 Partial correlation coefficients between each factor and iron release

管道编号	pH	DO	Alk	Hardness	Cl^-	SO_4^{2-}	T	HRT
1	0.143		-0.602	0.323	0.446	0.668		—
2	-0.380	-0.422	-0.407	0.423	0.457	0.624		—
3	-0.371	0.506	-0.331		0.239		0.607	0.652
4	-0.295	0.354			0.314	0.166	0.453	0.850
5	-0.211		-0.487		0.542	0.538	0.218	0.756
6		-0.240	-0.556		0.523	0.556	-0.169	

1) 单元格为空表示该项不显著;因 1、2 号管道的 HRT 固定为 8 h,故无法作为变量,也不作为控制变量,用“—”表示

偏相关系数和标准化系数的正负性始终一致^[19],故不再赘述各因素对铁释放量的定性影响.

表 4 中偏相关系数绝对值大小,即影响因素相对重要性排序如下.

1 号: $\text{SO}_4^{2-} > \text{Alk} > \text{Cl}^- > \text{Hardness} > \text{pH}$

2 号: $\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{Hardness} > \text{DO} > \text{Alk} > \text{pH}$

3 号: $\text{HRT} > T > \text{DO} > \text{pH} > \text{Alk} > \text{Cl}^-$

4 号: $\text{HRT} > T > \text{DO} > \text{Cl}^- > \text{pH} > \text{SO}_4^{2-}$

5 号: $\text{HRT} > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Alk} > T > \text{pH}$

6 号: $\text{SO}_4^{2-} \approx \text{Alk} > \text{Cl}^- > \text{DO} > T$

本研究的 8 个影响因素中,每段管道偏相关系数显著的因素有 5~6 个.在排名前四的影响因素中,这 8 个因素均出现过;在排名前三的因素中,除 pH 外的 7 个因素出现过;在排名前两位的因素中,除 pH、DO 和硬度外的 5 个因素均出现过,其中 SO_4^{2-} 、HRT 各出现 3 次,Alk、 Cl^- 和 T 各出现 2 次; SO_4^{2-} 、HRT 和 Alk 出现在第一位.综合出现位次和次数,用偏相关系数分析,本研究认为 SO_4^{2-} 、HRT、Alk、 Cl^- 和 T 是相对更重要的因素.由于偏相关系数取值在 -1~+1 之间,不同组的系数大小可以相互比较,计算 SO_4^{2-} 、HRT、Alk、 Cl^- 和 T 的偏相关系数绝对值大小的平均值分别为 0.510、0.753、0.477、0.420、0.362.故这 5 个因素的排序为 $\text{HRT} > \text{SO}_4^{2-} > \text{Alk} > \text{Cl}^- > T$.

2.3 两种系数衡量影响因素相对重要性结果比较

1、4、5 号管道各因素的偏相关系数排序和标准化系数排序完全相同(除 4 号管道 Alk 对应的偏相关系数不显著),2、3、6 号管道的两个系数排序

不完全一致.标准化系数可用于衡量某自变量对因变量的影响,但无法排除其他自变量与该自变量有关联从而对因变量产生间接影响.偏相关系数则扣除了这种间接影响,从本质上反映了该自变量与因变量的关系.因此在进行机理研究时,偏相关系数更能反映铁释放量与影响因素本质上的关联,而在控制铁释放的实际操作中,很难避免各因素间的相互影响,这时标准化系数的结果就更能反映实际中呈现出的表现现象.

结合两种系数分析的结果来看, HRT、 SO_4^{2-} 和 Cl^- 用两种系数比较,都是相对重要的影响因素;而 T 用偏相关系数排序比用标准化系数排序偏后;Alk 用偏相关系数衡量相对重要性时显得重要. HRT 对铁释放的影响很直观, HRT 的增长会导致铁释放量增加.许多研究表明, SO_4^{2-} 是引起管网铁释放最重要的因素之一^[26,28]. Cl^- 和 SO_4^{2-} 都是拉森指数中的因素,拉森指数是衡量水的化学稳定性的重要指标并在实际中有着广泛应用.这表明本研究得到的重要影响因素与实际情况相符,本研究所用方法可靠.

3 结论

本研究用逐步回归建立了铁释放的非线性幂指数模型,模型拟合效果良好.用标准化系数衡量影响因素相对重要性时,相对重要的因素及其排序为 $\text{SO}_4^{2-} \approx \text{HRT} > \text{Cl}^- > T$;用偏相关系数衡量时,相对重要的因素及其排序为 $\text{HRT} > \text{SO}_4^{2-} > \text{Alk} > \text{Cl}^- > T$.当两种系数的重要性排序不一致时,偏相关系数的排序更能反映影响因素与铁释放量本质上的相

关关系, 而标准化系数则更能反映表观上的相关关系。综合两种系数的分析结果, HRT、 SO_4^{2-} 和 Cl^- 是相对重要的因素, 在控制管网铁释放问题中需重点关注。

参考文献:

- [1] 中国城镇供水排水协会. 城市供水统计年鉴 2015 [M]. 北京: 中国城镇供水排水协会, 2015. 58-59.
- [2] Reiber S, Poulson S, Perry S A, *et al.* A general framework for corrosion control based on utility experience [M]. Denver: American Water Works Association, 1997.
- [3] Zhang X J, Mi Z L, Wang Y, *et al.* A red water occurrence in drinking water distribution systems caused by changes in water source in Beijing, China: mechanism analysis and control measures [J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2014, **8**(3): 417-426.
- [4] 郑毅, 彭晨蕊, 谭浩, 等. 给水管网内铁离子的释放[J]. 天津大学学报, 2008, **41**(2): 137-141.
Zheng Y, Peng C R, Tan H, *et al.* Iron release in water distribution network[J]. *Journal of Tianjin University*, 2008, **41**(2): 137-141.
- [5] 牛璋彬, 王洋, 张晓健, 等. 给水管网中铁释放现象的影响因素研究[J]. 环境科学, 2007, **28**(10): 2270-2274.
Niu Z B, Wang Y, Zhang X J, *et al.* Effect on iron release in drinking water distribution systems[J]. *Environmental Science*, 2007, **28**(10): 2270-2274.
- [6] 谭浩强, 何文杰, 韩宏大, 等. 水力条件对供水管网铁释放的影响研究[J]. 中国给水排水, 2014, **30**(3): 56-58.
Tan H Q, He W J, Han H D, *et al.* Effect of hydraulic conditions on iron release in water distribution system[J]. *China Water & Wastewater*, 2014, **30**(3): 56-58.
- [7] 牛铁柱, 徐强, 陈求稳, 等. 通过遗传编程建立铸铁管道铁释放速率模型研究[J]. 给水排水, 2015, **41**(S1): 349-354.
- [8] Imran S A, Dietz J D, Mutoti G, *et al.* Red water release in drinking water distribution systems [J]. *Journal of American Water Works Association*, 2005, **97**(9): 93-100.
- [9] Mutoti G, Dietz J D, Imran S A, *et al.* Pilot-scale verification and analysis of iron release flux model [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2007, **133**(2): 173-179.
- [10] 宛云杰, 鲁智礼, 石宝友, 等. 调节拉森指数和碳酸钙沉淀势对管网铁释放的影响[J]. 中国给水排水, 2015, **31**(19): 1-7.
Wan Y J, Lu Z L, Shi B Y, *et al.* Effects of Larson ratio and calcium carbonate precipitation potential adjustment with different chemicals on iron release in distribution system[J]. *China Water & Wastewater*, 2015, **31**(19): 1-7.
- [11] 王刚亮, 鲁智礼, 石宝友, 等. 投加不同碱性药剂对管网铁释放的影响[J]. 环境科学研究, 2015, **28**(1): 134-140.
Wang G L, Lu Z L, Shi B Y, *et al.* Effects of different alkaline chemical dosing on iron release in drinking water distribution systems [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2015, **28**(1): 134-140.
- [12] 鲁智礼, 王刚亮, 石宝友, 等. 消毒剂和溶解氧对管网铁释放影响的中试研究[J]. 环境工程学报, 2014, **8**(4): 1410-1416.
Lu Z L, Wang G L, Shi B Y, *et al.* Pilot study on effects of disinfectant and dissolved oxygen on iron release in distribution system [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2014, **8**(4): 1410-1416.
- [13] 迟海燕. 非传统水源供水管网水质模型的研究[D]. 天津: 天津大学, 2010. 65-70.
Chi H Y. Study on water quality model of water distribution network of non-traditional water source [D]. Tianjin: Tianjin University, 2010. 65-70.
- [14] 黄纯凯. 既有给水管网输配淡化海水水质稳定性控制研究[D]. 天津: 天津大学, 2012. 41-45.
Huang C K. Water quality control of desalinated water distribution by cast iron pipe network [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012. 41-45.
- [15] 刘扬. 水质变化对腐蚀管段中铁释放的影响[D]. 天津: 天津大学, 2010. 42-47.
Liu Y. The effect of water quality variations on iron release in corroded pipe [D]. Tianjin: Tianjin University, 2010. 42-47.
- [16] 王刚亮. 水源切换条件下给水管网铁释放控制的中试研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2014. 15-48.
Wang G L. Pilot study on iron release control in drinking water distribution system under source water switch [D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2014. 15-48.
- [17] 宛云杰. 多水源供水模式下管网水质腐蚀性与铁释放控制的中试研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2015. 15-65.
Wan Y J. Pilot study on the water corrosivity of drinking water distribution system and iron release control under different source water supply [D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2015. 15-65.
- [18] 张文彤, 邱春伟. SPSS 统计分析基础教程 [M]. (第二版). 北京: 高等教育出版社, 2011. 336-359.
- [19] 王海燕, 杨方廷, 刘鲁. 标准化系数与偏相关系数的比较与应用[J]. 数量经济技术经济研究, 2006, **23**(9): 150-155.
Wang H Y, Yang F T, Liu L. Comparison and application of standardized regressive coefficient & partial correlation coefficient [J]. *The Journal of Quantitative & Technical Economics*, 2006, **23**(9): 150-155.
- [20] Benson A S, Dietrich A M, Gallagher D L. Evaluation of iron release models for water distribution systems [J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2012, **42**(1): 44-97.
- [21] 高玖黎. 供水管道铁释放现象影响因素研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013. 18-62.
Gao J L. Research of influencing factors on iron release in water distribution system [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013. 18-62.
- [22] 牛铁柱, 徐强, 陈求稳, 等. Larson 指数、溶解氧和余氯浓度变化对管网铁释放的影响[J]. 给水排水, 2015, **41**(3): 148-153.
Niu T Z, Xu Q, Chen Q W, *et al.* Influence of Larson index, dissolved oxygen and residual chlorine on ferric iron releasing in pipe network [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2015, **41**(3): 148-153.
- [23] 谭浩强. 城市供水管网铁释放特性及其风险管理[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015. 8-63.
Tan H Q. Characteristics and risk management of iron release in drinking water distribution systems [D]. Harbin: Harbin Institute

- of Technology, 2015. 8-63.
- [24] 徐硕. 水源切换对管网铁释放影响的模拟研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2013. 6-44.
- Xu S. Simulation pilot study on the effect of water source switch on iron release in drinking water distribution systems [D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2013. 6-44.
- [25] 孙慧芳, 石宝友, 吴永丽, 等. 硫酸根、溶解氧和余氯对管垢铁释放的影响[J]. 中国给水排水, 2013, **29**(22): 58-63.
- Sun H F, Shi B Y, Wu Y L, *et al.* Effects of sulphate, dissolved oxygen and residual chlorine on iron release from cast iron pipes with different scale characteristics [J]. China Water & Wastewater, 2013, **29**(22): 58-63.
- [26] 米子龙, 张晓健, 陆品品, 等. 硫酸根浓度突变对给水管网铁释放的影响[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2013, **53**(5): 660-664.
- Mi Z L, Zhang X J, Lu P P, *et al.* Effect of sulphate concentration change on iron release in drinking water distribution systems [J]. Journal of Tsinghua University (Science & Technology), 2013, **53**(5): 660-664.
- [27] 吴永丽, 石宝友, 孙慧芳, 等. 水中硫酸根及溶解氧质量浓度变化对管垢金属元素释放的影响[J]. 环境科学, 2013, **34**(9): 3480-3485.
- Wu Y L, Shi B Y, Sun H F, *et al.* Effect of the change in sulphate and dissolved oxygen mass concentration on metal release in old cast iron distribution pipes [J]. Environmental Science, 2013, **34**(9): 3480-3485.
- [28] Yang F, Shi B Y, Bai Y H, *et al.* Effect of sulfate on the transformation of corrosion scale composition and bacterial community in cast iron water distribution pipes [J]. Water Research, 2014, **59**: 46-57.



CONTENTS

Regional Transport Matrix Study of PM _{2.5} in Jingjinji Region, 2015	WANG Yan-li, XUE Wen-bo, LEI Yu, <i>et al.</i> (4897)
Effect of Atmospheric Haze Based on Multi-source Remote Sensing Data Considering the Size Effect of Landscape Sources and Sinks	XU Kai, YU Tian-tian, SUN Jiao-jiao, <i>et al.</i> (4905)
Space-Time Estimations and Mapping of PM _{2.5} Fine Particulates Based on Multi-source Data	XIAO Lu, LANG Yi-chao, XIA Lang, <i>et al.</i> (4913)
Exposure Level of Population and Economy in Zhejiang Province Considering the Background of PM _{2.5} in East China	YU Zhen-yan, GAO Da-wei, LI Zheng-quan, <i>et al.</i> (4924)
Aerosol Chemical Characteristics for Different Air Pollution Levels in North Suburban Nanjing	ZHANG Cheng, YU Xing-na, AN Jun-lin, <i>et al.</i> (4932)
Seasonal Variation of Carbon Fractions in PM _{2.5} in Heze	LIU Ze-jun, WU Jian-hui, ZHANG Yu-fen, <i>et al.</i> (4943)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Inorganic Ions in Road Dust PM _{2.5} in Selected Cities in Liaoning Province	ZHANG Wei, JI Ya-qin, ZHANG Jun, <i>et al.</i> (4951)
Characteristics of the Size Distribution of Water-soluble Ions During a Heavy Pollution Episode in the Winter in Tianjin	YAO Qing, LIU Zi-rui, HAN Su-qin, <i>et al.</i> (4958)
Physico-chemical Characteristic Analysis of PM _{2.5} in the Highway Tunnel in the Plateau City of Kunming	WANG Cheng-hui, YAN Kun, HAN Xin-yu, <i>et al.</i> (4968)
Characteristics Analysis of the Surface Ozone Concentration of China in 2015	DUAN Xiao-tong, CAO Nian-wen, WANG Xiao, <i>et al.</i> (4976)
Effects of Different Precious Metal Loads of CDPF on Characteristics of VOCs Emissions from a Diesel Bus	LOU Di-ming, ZHANG Zi-jun, LIU Ji-yue, <i>et al.</i> (4983)
Influence of ENSO Events on the Hydrogen ($\delta^2\text{H}$) and Oxygen ($\delta^{18}\text{O}$) Isotopic Values of Precipitation in Shanghai	DONG Xiao-fang, YANG Hua-wei, ZHANG Luan, <i>et al.</i> (4991)
Deposition of Sulfur, Nitrogen and Mercury in Two Typical Forest Ecosystems in Southern China	CHENG Zheng-lin, LUO Yao, ZHANG Ting, <i>et al.</i> (5004)
Spatial and Temporal Variability of CO ₂ Emissions from the Xin'anjiang Reservoir	YANG Le, LI He-peng, SUN Bin-feng, <i>et al.</i> (5012)
Evaluation of Temporal and Spatial Variation Characteristics of Nutrients in Surface Sediment in the Three Gorges Reservoir Area	ZHUO Hai-hua, QIU Guang-sheng, ZHAI Wan-ying, <i>et al.</i> (5020)
Distribution of Different Mercury Species in the Waterbody at Sanmenxia Reservoir	CHENG Liu, MA Bing-juan, ZHOU Wei-li, <i>et al.</i> (5032)
Identification of Nitrate Sources and Transformation Processes in Midstream Areas; A Case in the Taizi River Basin	LI Yan-li, SUN Wei, YANG Zi-rui (5039)
Characteristics of Nitrogen Variation and Its Response to Rainfall; A Case Study in Wuxi Port at Taihu Lake Basin	LIAN Hui-shu, LIU Hong-bin, LI Xu-dong, <i>et al.</i> (5047)
Dynamics of the Water Quality in a Broad-leaf Evergreen Forest at Different Spatial Levels on Jinyun Mountain	MA Ming, SUN Tao, LI Ding-kai, <i>et al.</i> (5056)
Method of Improving the Water Quality of Polluted Rivers Based on the MIKE11 Model	XIONG Hong-bin, CHEN Xue, ZHANG Si-si (5063)
Distribution Characteristics and Risk Analysis of Antibiotic in the Groundwater in Beijing	CHEN Wei-ping, PENG Cheng-wei, YANG Yang, <i>et al.</i> (5074)
Characteristics of Carbon and Nitrogen in the Downstream Columnar Sediment of Maozhou River, Shenzhen	LING Jun-hong, ZHANG Yi-zhang, WANG Min-hao, <i>et al.</i> (5081)
Relative Importance of Factors Influencing Iron Release in Drinking Water Distribution Systems	LIU Ying, YU Ying, SHI Bao-you, <i>et al.</i> (5090)
Removal of High Concentration of Iron, Manganese and Ammonia Nitrogen from Low Temperature Groundwater Using Single Bio-filter	LI Dong, CAO Rui-hua, YANG Hang, <i>et al.</i> (5097)
Mechanism of Pre-ozonation Enhanced Coagulation on DON in the Secondary Effluent	LIU Bing, ZHENG Yu-ming, WANG Da-xiang, <i>et al.</i> (5106)
Base Activation of Peroxymonosulfate for the Degradation of Ciprofloxacin in Water	GE Yong-jian, CAI Xian-wei, LIN Han, <i>et al.</i> (5116)
MIL-88A@MIP Activated Persulfate for Targeted Degradation of Dibutyl Phthalate	WANG Jiu-mei, GUAN Ze-yu, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (5124)
Methane Cycle Anaerobic Membrane Bioreactor with Desulfurization for Treating High Sulfate Organic Wastewater at Normal Temperature	XU Ting, JIN Yan-qing, LI Yong (5132)
Simultaneous Recovery of Nutrients from Wastewater by Mesoporous MgO-loaded Natural Zeolite	CHENG Xue-jun, WANG Xue-jiang, WANG Hao, <i>et al.</i> (5139)
Phosphorus Removal Capacity of Domestic Wastewater Treated by a Modified CAST Process Under Different Operating Modes	MA Juan, WANG Jin, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (5146)
Realization of Shortcut Nitrification in the ABR-MBR Process Treating Domestic Wastewater	LÜ Liang, ZHAO Shi-hui, WEI Jia-min, <i>et al.</i> (5154)
Substrate Inhibition and Kinetic Characteristics of Marine Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria Treating Saline Wastewater	ZHOU Tong, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (5162)
Effect of Free Ammonia on Ammonia Escape During an Ammonia Oxidation Process	SUN Hong-wei, YU Xue, YOU Yong-jun, <i>et al.</i> (5169)
Water Quality and Diversity of Denitrifier Community Structure of Typical Scenic Water Bodies in Xi'an	KANG Peng-liang, HUANG Ting-lin, ZHANG Hai-han, <i>et al.</i> (5174)
Start-up and Characteristics of the Microbial Community Structure of ANAMMOX	WANG Yao-qi, ZHANG Min, JIANG Ying, <i>et al.</i> (5184)
Fast Start-up and Performance of the CANON Process Based on a SBAF System and Evolution Properties of Microorganisms	YUE Xiu, LIU Zhu-han, YU Guang-ping, <i>et al.</i> (5192)
Enrichment of <i>Nitrospira</i> in Activated Sludge and Kinetic Characterization	YAO Qian, PENG Dang-cong, ZHAO Qiao-di, <i>et al.</i> (5201)
Effect of pH Value on Autotrophic Denitrification Process of Zero Valent Iron Substrate	ZHANG Ning-bo, LI Xiang, HUANG Yong (5208)
Effect of Seeding Single/Mixed Sludge on Rapid Start-up of an ANAMMOX Reactor	ZHANG Ze-wen, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (5215)
Comparison of Start-up and Stable Performance of Nitrification in Activated Sludge and Biofilm Processes in a SBR	SUN Yi-qi, BIAN Wei, WANG Meng, <i>et al.</i> (5222)
Long-term Impacts of TiO ₂ Nanoparticles on the Stability of an Anaerobic Granular Sludge Bioreactor	LI Hui-ting, CUI Fu-yi (5229)
Composition and Distribution of Antibiotics in Soils with Different Land Use Types in a Typical Peri-urban Area of the Yangtze River Delta	ZHAO Fang-kai, CHEN Li-ding, YANG Lei, <i>et al.</i> (5237)
Distribution of Phosphorus in Soil Profiles after Continuous Application of Different Fertilizers	ZHANG Tian, XU Hao, RU Shu-hua, <i>et al.</i> (5247)
Occurrence of Organophosphate Esters in Soils of the Three Gorges Reservoir	HE Ming-jing, YANG Ting, YANG Zhi-hao, <i>et al.</i> (5256)
Pollution Characteristics, Source Analysis and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soils Surrounding a Municipal Solid Waste Incineration Plant in Shanghai	GUO Yan-hai, SUN Xu-chao, ZHANG Shi-bing, <i>et al.</i> (5262)
Comparison of Characteristics and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Different Environmental Media in the Urban Area of Daqing City	SONG Ning-ning, FENG Jia-shen, YU Yang, <i>et al.</i> (5272)
Magnetic Response of Heavy Metal Pollution in Playground Dust of an Industrial Area	YANG Meng, LI Hui-ming, LI Feng-ying, <i>et al.</i> (5282)
Distribution Characteristics and Health Risk for Heavy Metals in Vegetables Near the Industrial Areas in Shanghai	ZHOU Ya, BI Chun-juan, ZHOU Xiao-xiao, <i>et al.</i> (5292)
Impacts of Silicon Fertilizer as Base Manure on Cadmium Bioavailability in Soil and on Cadmium Accumulation in Rice Plants	GAO Zi-xiang, ZHOU Hang, YANG Wen-tao, <i>et al.</i> (5299)
Uptake and Volatilization of Gaseous Elemental Mercury by Paddy Rice	SHANG Shuai, TIAN Pei, JIANG Yu, <i>et al.</i> (5308)
Long Term Variations of Ozone Concentration of in a Winter Wheat Field and Its Loss Estimate Based on Dry Matter and Yield	ZHAO Hui, ZHENG You-fei, LI Shuo, <i>et al.</i> (5315)
Control Effect of Side Deep Fertilization with Slow-release Fertilizer on Ammonia Volatilization from Paddy Fields	HOU Peng-fu, XUE Li-xiang, YU Ying-liang, <i>et al.</i> (5326)
Effects of Biochar and Organic Fertilizer on Saline-alkali Soil N ₂ O Emission in the North China Plain	SHI Yu-long, LIU Xing-ren, GAO Pei-ling, <i>et al.</i> (5333)
Flux Characteristics of CO ₂ , CH ₄ , and N ₂ O and their Influencing Factors in Different Types of Ditches on the Chengdu Plain	FENG Xiang-rong, DENG Ou-ping, DENG Liang-ji, <i>et al.</i> (5344)
Review of CO ₂ and CH ₄ Emissions from Rivers	WANG Xiao-feng, YUAN Xing-zhong, CHEN Huai, <i>et al.</i> (5352)