

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.2

第40卷 第2期

目次

冬季山谷风和海陆风对京津冀地区大气污染分布的影响	李青春, 李炬, 郑祚芳, 王耀庭, 于淼 (513)
珠三角地区利用 PM _{2.5} 反演气溶胶数浓度谱方法	李菲, 谭浩波, 邓雪娇, 邹宇, 刘礼, 蔡明甫, 张芷言, 周声圳 (525)
广州冬季气溶胶中水溶性有机物和类腐殖质的吸光性和荧光光谱特性	范行军, 余旭芳, 操涛, 王艳, 肖新, 谢越, 李飞跃, 宋建中, 彭平安 (532)
扬州市 PM _{2.5} 中重金属来源及潜在健康风险评估	董世豪, 谢扬, 皇甫延琦, 史旭荣, 易睿, 史国良, 冯银厂 (540)
聊城市冬季 PM _{2.5} 中正构烷烃和糖类的污染特征及来源解析	刘晓迪, 孟静静, 侯战方, 衣雅男, 魏本杰, 伏梦璇 (548)
博斯腾湖流域大气多环芳烃污染特征、干沉降通量及来源	宋世杰, 黄韬, 赵留元, 毛潇萱, 穆熙, 高宏, 马建民 (558)
某集约化肉鸡饲养场 PM _{2.5} 中抗生素抗性基因的分布特征	刘菲, 许霞, 屠博文, 汪楚乔, 江晓栋, 王利平, 薛银刚 (567)
水汽源地和局地蒸发对大气降水氢氧稳定同位素组分的影响	胡勇博, 肖薇, 钱雨妃, 刘强, 谢成玉, 张秀芳, 张文庆, 温学发, 刘寿东, 李旭辉 (573)
滇池大气沉降氮磷形态特征及其入湖负荷贡献	任加国, 贾海斌, 焦立新, 王一茹, 杨苏文, 武倩倩, 高秋生, 崔志丹, 郝子峰 (582)
基于地统计学分析的太湖颗粒态和溶解态氮、磷营养盐时空分布特征及来源分析	吕伟伟, 姚昕, 张保华, 高光, 邵克强 (590)
湖泊蓝藻水华对连通河道水质的影响	余茂蕾, 洪国喜, 许海, 朱广伟, 朱梦圆, 权秋梅 (603)
异龙湖沉积物重金属人为污染与潜在生态风险	李小林, 刘恩峰, 于真真, 张恩楼, 王荣, 沈吉 (614)
珠江河口悬浮物中重金属时空变化特征及其影响因素	杜佳, 王永红, 黄清辉, 戴琦, 杨远东 (625)
北运河粪源微生物分布特征及健康风险评价	陈磊, 李蕾芳, 邱晓沙, 张普, 戴莹, 肖月晨, 沈珍瑶 (633)
氧化还原循环过程中沉积物磷的形态及迁移转化规律	郝文超, 王从锋, 杨正健, 刘德富, 纪道斌, 赵萍, 丹勇, 胡子龙 (640)
磁性赭铁改性膨润土添加对河道底泥磷迁移与形态转化的影响	王艳, 林建伟, 詹艳慧, 张宏华, 张志斌, 何思琪, 赵钰颖, 吴小龙, 俞阳 (649)
钙预处理对磁性赭铁改性膨润土吸附水中磷酸盐的影响	赵钰颖, 林建伟, 张宏华, 张志斌, 詹艳慧, 姜博汇, 何思琪, 俞阳, 吴小龙, 王艳, 陈璐, 李十盛 (658)
NH ₄ ⁺ 对镁改性生物炭除磷效果的影响	郭蒙蒙, 王鹏飞, 侯泽英, 曹晶, 储昭升, 杨永哲 (669)
3 种吸附剂对污水磷污染去除性能与机制比较	吴露, 刘锋, 龙睿, 罗沛, 肖润林, 陈向, 吴金水 (677)
硝酸纤维素膜光降解水中对硝基苯酚的机制	代志峰, 赵同谦, 阴永光, 余加平, 武俐, 邵超, 孙静阳, 罗玉俊 (685)
ZnTiO ₂ -TiO ₂ 复合光催化剂的制备及光催化降解有机污染物机制分析	张文海, 吉庆华, 兰华春, 李静 (693)
高指数晶面 TiO ₂ 对铬的吸附及光催化去除	钟德健, 张建峰, 李尧, 谢晓丹 (701)
Fe ⁰ /海藻酸钙微球还原-Fenton 氧化协同降解酸性红 B	张环, 李爽爽, 魏俊富, 傅敏, 李雪曦, 丁琦, 白蓉 (708)
不同滤料滤池启动期对铁锰离子的去除机制	蔡言安, 毕学军, 张嘉凝, 何静, 董杨, 王海港 (717)
SGO 改性复合纳滤膜的制备及分盐性能	张彦君, 张少峰, 赵长伟, 王军 (724)
一体式铝盐絮体-超滤膜净水效能与机制	薛文静, 李文江, 刘娟, 马百文 (730)
臭氧-CNT 膜改性联用工艺处理高盐废水及膜污染分析	王凯伦, 刘芳, 关羽琪, 祝学东, 董丹, 薛小雷, 马燕林, 栾桂荣, 郭瑾 (738)
多环芳烃及其衍生物在 SBR/MBBR 工艺中的分布与去除	刘淑惠, 周伟君, 周建仁, 赵婧, 王喆 (747)
微气泡曝气生物膜反应器处理低 C/N 比废水脱氮过程	刘春, 王聪聪, 陈晓轩, 张静, 张瑞娜, 张磊 (754)
从枝菌根强化型生态浮床处理煤化工模拟含盐废水	窦文清, 何皓, 宋文萍, 王曙光, 戴东伟 (761)
夏季高温下污水处理厂生物处理系统的硝化性能及强化方法	宋天伟, 盛晓琳, 王家德, 刘锐, 陈吕军 (768)
硝化包埋菌颗粒氨吸附性能及动力学特性	于德爽, 吕廷廷, 陈光辉, 王晓霞, 唐鹏, 黄硕, 刘诚诚, 杜世明 (774)
乙酸钠作为碳源不同污泥源短程反硝化过程亚硝酸盐积累特性	毕春雪, 于德爽, 杜世明, 王晓霞, 陈光辉, 王钧, 巩秀珍, 都叶奇 (783)
DPR-SNED 系统处理低 C/N 城市污水与硝酸盐废水的运行特性	杜世明, 于德爽, 毕春雪, 王晓霞, 陈光辉, 袁梦飞, 甄建国, 张帆, 吕廷廷 (791)
间歇曝气连续流反应器同步硝化反硝化除磷	赵智超, 黄剑明, 李健, 张为堂, 张力航, 吴雪晴, 陈永志 (799)
ABR-MBR 反硝化除磷工艺的启动及稳定运行	韦佳敏, 蒋志云, 程诚, 朱琳, 刘文如, 沈耀良 (808)
进水 C/N 对 SNEDPR 系统脱氮除磷的影响	都叶奇, 于德爽, 甄建国, 王晓霞, 陈光辉, 唐鹏, 王钧, 毕春雪, 巩秀珍, 黄硕, 刘诚诚 (816)
ABR 除碳-CANON 耦合工艺除碳脱氮特性	李田, 印雯, 王昕竹, 沈耀良, 吴鹏, 宋吟玲 (823)
不同曝气密度对 CANON 工艺启动的影响	李冬, 高雪健, 张杰, 曹正美, 郭跃洲, 李帅 (829)
调控温度和沉降时间实现 ANAMMOX 颗粒快速启动及其稳定运行	李海玲, 李冬, 张杰, 刘博, 李帅 (837)
C/N 和污泥浓度对以 pH 值调控的亚硝化系统影响	张敏, 韦佳敏, 黄慧敏, 姜滢, 郭萌蕾, 陈重军, 沈耀良 (845)
基于活性微生物特征的供水管壁生物膜生长特性	王杨, 朱斌, 童俊, 白晓慧 (853)
黄山土壤细菌群落和酶活性海拔分布特征	姚兰, 胡立煌, 张焕朝, 方炎明, 王良梅 (859)
基于高通量测序分析的生物修复石油污染土壤菌群结构变化	祁燕云, 吴蔓莉, 祝长成, 叶茜琼, 徐会宁 (869)
硝化作用对盐碱湿地 N ₂ O 排放的影响及其环境因子分析	杨曲, 高伟峰, 刘凤琴, 王文锋, 马建华, 徐卓, 梁红, 高大文 (876)
长期定位施用牛粪对夏玉米-冬小麦体系农田 N ₂ O 和 NO 排放的影响	聂皇华, 张家升, 和周明, 安梅, 杨学云, 顾江新 (885)
地膜覆盖和施氮对菜地 N ₂ O 排放的影响	倪雪, 郝庆菊, 陈世杰, 李晓茜, 石孝均, 江长胜 (893)
双季稻品种根际特征与甲烷排放差异及其关系	肖志祥, 傅志强, 徐华勤, 苏姗, 郭昱, 张浪, 唐剑武 (904)
多年施用生物炭对河南烤烟种植区土壤呼吸的影响	李亚森, 丁松爽, 殷全玉, 李佳轶, 周迪, 刘国顺 (915)
桂林毛村不同土地利用方式下土壤呼吸空间变异特征	丁梦凯, 胡晓农, 曹建华, 吴夏, 黄芬, 王奇岗, 闵佳 (924)
工业发达城市土壤重金属时空变异与源解析	李峰, 刘思源, 李艳, 史舟 (934)
膨润土对不同类型农田土壤重金属形态及生物有效性的影响	林海, 靳晓娜, 董颖博, 罗明科, 赵一鸣 (945)
缙云山不同林分下土壤有机碳及矿化特征	陈仕奇, 吕盛, 高明, 黄容 (953)
复杂地形条件下根系对土壤有机碳的贡献	张彦军, 郭胜利 (961)
不同水平外源碳在稻田土壤中转化与分配的微生物响应特征	王季斐, 童瑶瑶, 祝贞科, 陈珊, 邓扬悟, 葛体达, 吴金水 (970)
宝鸡市植被叶子重金属分布规律及生态风险评价	张俊辉, 林青, 姜珊, 刘滨, 李东兴, 王彦虎 (978)
生物炭对污泥堆肥及其利用过程重金属有效态的影响	周楫, 余亚伟, 蒋越, 杨雨滢, 张成 (987)
污泥停留时间对餐厨垃圾与剩余污泥中温厌氧混合发酵系统的影响	袁宏林, 马静, 邢保山, 温俊伟, 韩宇乐, 李倩, 王晓昌 (994)
热碱-分步酶水解-厌氧消化工艺处理秸秆畜禽粪混合物料及其甲烷高值化条件	卞爱琴, 远野, 张璐璐, 付强, 陈天明, 何磊, 丁成, 王爱杰 (1003)
《环境科学》征订启事 (547)	
《环境科学》征稿简则 (828)	
信息 (581, 933, 952)	

北运河粪源微生物分布特征及健康风险评价

陈磊^{1,2}, 李蕾芳^{1,2}, 郅晓沙^{1,2}, 张普^{1,2}, 戴莹^{1,2}, 肖月晨^{1,2}, 沈珍瑶^{1,2,3*}

(1. 北京师范大学环境学院, 北京 100875; 2. 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100875; 3. 水沙科学教育部重点实验室, 北京 100875)

摘要: 河流微生物污染研究对流域水环境保护和公共卫生管理至关重要。本研究以海河流域北运河水系典型河流断面为研究对象, 系统评估了北运河水系微生物污染特征及其健康风险。结果表明, 北运河水系丰水期的粪源微生物污染严重, 大部分断面菌群量超过 10^5 MPN·L⁻¹, 平水期和枯水期粪源微生物菌群量约为 $10^3 \sim 10^5$ MPN·L⁻¹, 变化不显著; 流域内的农业河段粪源微生物最为严重, 呈劣五类水体概率超 60%, 城市河段降雨前后粪源微生物含量变化更明显, 部分河流断面的粪源微生物菌群量从 10^3 MPN·L⁻¹ 增长为 10^6 MPN·L⁻¹; 2017 年丰水期, 北运河水系粪大肠菌群的单次暴露风险主要在 0.015 ~ 0.035 之间, 莲花河、马草河、清河下、温榆河下为人体健康风险的关键敏感断面, 需重点关注。

关键词: 粪源指示微生物(FIB); 海河流域; 时空分布; 暴露风险; 非点源污染

中图分类号: X522; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)02-0633-07 DOI: 10.13227/j.hj.kx.201806197

Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Microorganism Pollutions in the Beiyun River

CHEN Lei^{1,2}, LI Lei-fang^{1,2}, ZHI Xiao-sha^{1,2}, ZHANG Pu^{1,2}, DAI Ying^{1,2}, XIAO Yue-chen^{1,2}, SHEN Zhen-yao^{1,2,3*}

(1. School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. State Key Laboratory of Water Environment Simulation and Pollutant Control, Beijing 100875, China; 3. Key Laboratory of Water-Sediment Science, Ministry of Education, Beijing 100875, China)

Abstract: Microorganism pollution in rivers is of great importance to the protection of watershed water quality and public health management. As a typical watershed of the Haihe River watershed, the Beiyun River was chosen as the study area, and the characteristics and health risk of microorganism pollution were assessed from a comprehensive perspective. The results showed that the microbial contamination of the fecal sources was serious during the wet season, and the microbial amount at most river sections was more than 10^5 MPN·L⁻¹. During the normal season and dry season, the microbial amount was approximately $10^3 \sim 10^5$ MPN·L⁻¹. Therefore, no obvious change could be observed. The fecal pollution in the agricultural river sections was the most severe, and the water quality of over 60% of these river sections was below the state Grade V level. The fecal microbial biomass of some urban river sections increased from 10^3 MPN·L⁻¹ to 10^6 MPN·L⁻¹ after the rainfall event, indicating an obvious change of fecal microbial pollution during the rainfall process. For the Beiyun River, the exposure risk of the fecal microbial biomass was mainly between 0.015-0.035, while the Lianhua River, Macao River, lower reaches of Qinghe River, and lower reaches of Wenyu River were hotspots for contamination. Greater attention should be paid to these areas.

Key words: fecal indicator bacteria (FIB); Haihe River watershed; spatial-temporal distribution; exposure risk; nonpoint source pollution

河流等地表水体是病原微生物传播扩散的重要途径, 水体微生物污染逐渐成为研究者关注的热点问题^[1]。有研究表明, 病原微生物经口摄入或其他途径感染人类^[2], 引发肠道感染等传染性疾病, 进而给人类的生存环境和健康安全造成严重的威胁^[3]。和常规物理化学污染物指标不同, 微生物不仅涉及到污染物在地表的累积和冲刷^[4], 还涉及了生长/死亡等过程, 其分布特征也更为复杂^[5]。当前由于监测数据的缺乏、机理探索的不足, 针对水体中病原微生物的长期、系统研究在我国仍是缺乏的, 尤其是人口高度集中的城市河流微生物污染情况不清晰^[6], 不利于流域水环境保护和公共卫生管理^[7]。

海河流域属于半干旱区域, 年内降水季节变化

显著, 受京津冀等大城市群影响, 其城市河流往往表现为以污水处理厂退水为主的非常规水源补给特征。作为海河流域的重要支流, 北运河水系贯穿整个北京, 承担着中心城区 90% 的排水任务, 沙河、清河、通惠河、凉水河等几大支流的雨污水均由北运河下泄, 全流域污水排入量约 300 万 t·d⁻¹, 是北京市污染最严重的河流, 也是病原微生物健康风险较大的河流^[8, 9]。因此, 本研究以北运河水系典型河流断面为研究对象, 选取我国现阶段采用的粪大

收稿日期: 2018-06-23; 修订日期: 2018-08-26

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41530635); 城市与区域生态国家重点实验室开放基金项目(SKLURE2017-2-2)

作者简介: 陈磊(1982~), 男, 博士研究生, 副教授, 主要研究方向为非点源污染控制, E-mail: chenlei1982bnu@bnu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: zyshen@bnu.edu.cn

肠菌群(fecal indicator bacteria, FIB)作为指示微生物,开展了历时1 a的野外监测和降雨过程监测,并结合定量微生物风险评价和景观要素分析,系统评估了北运河微生物污染健康风险及其影响因素,以期为海河流域城市河流微生物污染风险管理及合理安全地用水方法提供借鉴。

1 材料与方法

1.1 水样采集及微生物测试

本研究参照国家标准《水质采样方案设计技术规范》(HJ 495-2009),结合北运河水系土地类型、水功能区特性,共选择18个采样断面,具体情况如图1所示。其中,温榆河上段位于农林区域,清河上段、万泉河、坝河上段、通惠河上段、凉水河上段、莲花河、马草河等位于城市区域,通惠河下段、凤河上段、凤河下段和凤港减河位于农业区。采样时间为2016年6月到2017年5月,采样频次为每月1次。所有断面采样集中在3 d内完成,减少了采样时间间隔带来的影响。同时为了探究汛期降雨径流(非点

源)过程对河流微生物的影响,选择2017年5月20日降雨事件前后开展了河流断面样品采集。

本次的采样容器为无菌采样瓶,获得水样置于便携冰箱确保低温保存,24 h完成样品测试。按照国标《水质粪大肠菌群的测定多管发酵法和滤膜法(试行)》(HJ/T 347-2007)推荐的方法,采用多管发酵定量粪大肠菌群。

1.2 分布特征分析方法

根据北京市降雨特征,将整个采样周期分为丰水期、平水期和枯水期,通过对比不同水文期和降雨前后流域粪源微生物超标情况,进而识别北运河水系粪源微生物污染的关键时期。其中《地表水环境质量标准(GB 3838-2002)》中规定的粪大肠菌群I类、II类、III类、IV类、V类质量标准的临界值分别为200、2 000、10 000、20 000、40 000个·L⁻¹。

结合ArcGIS 10.0的子流域划分功能和水系分布矢量数据,利用ArcGIS进行配准、数字化和投影,得到北运河水系子流域分布矢量图(图1);结合ArcGIS 10.0软件分析粪源微生物空间分布特征,并采用IBM SPSS Statistics 20软件进行数据统计,识别北运河水系粪源微生物污染的关键断面。借助Clip功能将子流域矢量图与土地利用图进行融合,并采用ArcToolbox中的空间分析工具获取北运河水系各子流域的景观要素类型及其面积,最终利用Biplot图量化了各子流域景观要素比例对典型河流断面粪源微生物分布特征的影响。

1.3 健康风险评价方法

采用定量微生物风险评价方法(QMRA)量化河流微生物对于人体健康的潜在影响^[10]。健康风险评估是一种对人体暴露在危险环境中的不良健康反映的概率或产生程度的量化评价方法。常规定量微生物评价主要分为4个阶段,包括鉴定危险源、评价剂量反应、评价暴露风险和表征^[11]。关于微生物定量风险评估,基于其不同暴露途径有不同的剂量反应方程,需要结合具体事件和人群暴露情况特征^[12, 13],这是QMRA中最复杂也是不确定程度最高的环节,也是数据缺失最多的环节^[14]。本文研究水体北运河水系为城市地表河流水体,从国内外的研究案例来看对此类水体的暴露途径包括游泳、河道保洁、游船驾驶、钓鱼划船等^[10, 15]。

基于游泳的暴露途径的具体计算参照方程(1):

$$P_s = 5.21 \times \log_{10} M + 3.81 \quad (1)$$

式中, P_s 代表在每1 000人中出现肠胃疾病症状的数量; M 代表100 mL水样中的FC浓度(个·L⁻¹)。

对于其他暴露途径,依据孙傅等^[16]对该暴露途径的修正方程进行计算,修正方程见公式(2):

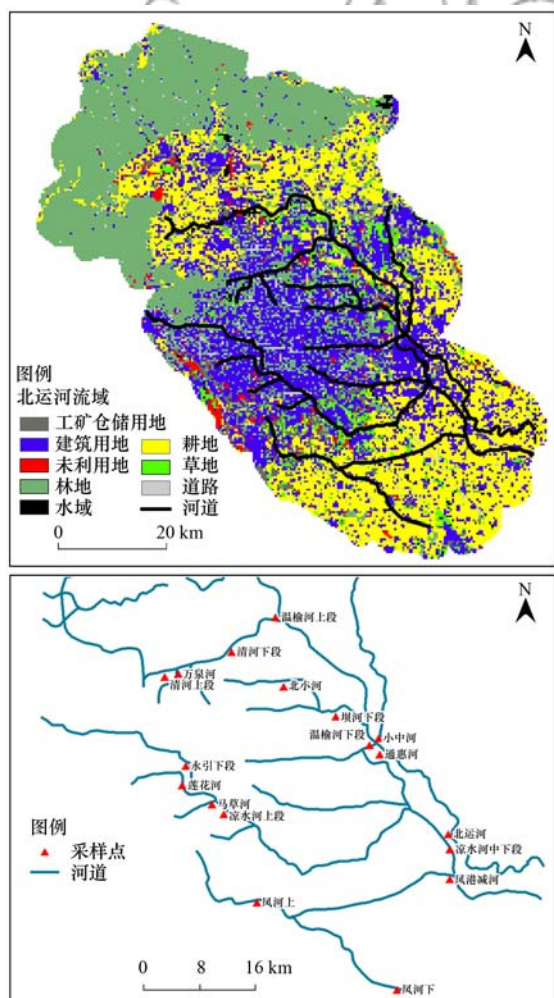


图1 北运河水系土地利用类型分布和采样点分布

Fig. 1 Distribution of land use and sampling points in the Beiyun River

$$M' = M \times V_{\text{non-swim}} / V_{\text{swim}} \quad (2)$$

式中, 水体中修正后微生物浓度和实际的微生物浓度分别用 M' 和 M 表示, 游泳和其它途径的摄入量分别用 V_{swim} 和 $V_{\text{non-swim}}$ 表示。

通过实地调研, 在丰水期和平水期, 人体暴露途径主要考虑河内游泳(游泳)、河道工作人员保洁(河道保洁)、游船人员驾驶(游船驾驶)、钓鱼和划船等; 在枯水期, 暴露途径主要考虑河道保洁。

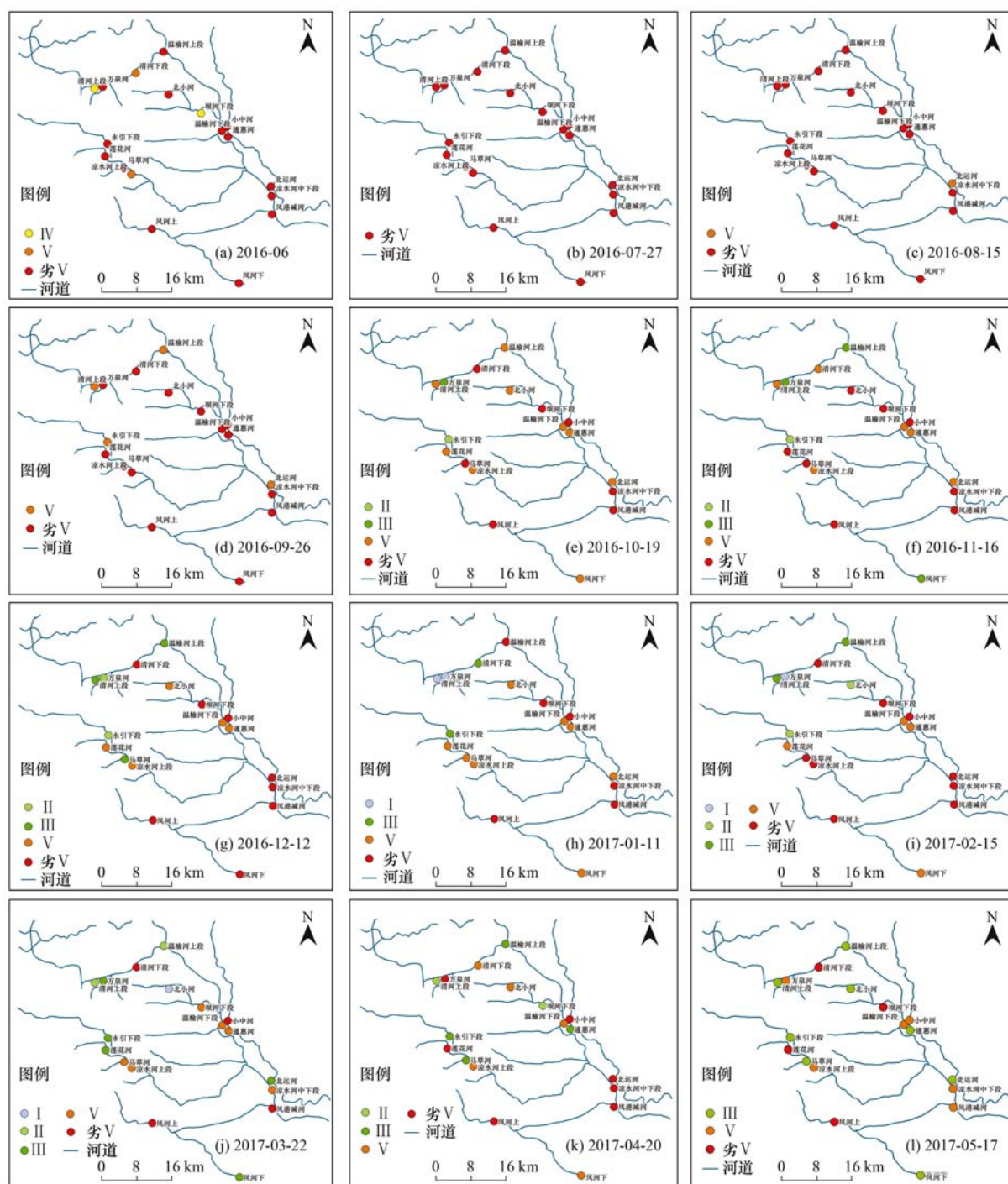
同时因为河流往往是下游地区的饮用水源, 河水经处理后作为饮用水, 其中微生物暴露所引起的

健康风险更应该引起足够的重视。本文研究断面和沿岸污水处理厂较多, 考虑到人力有限以及污水处理厂水样在获取上具有很大难度, 污水处理厂出水中涉及到的饮用途径健康风险还待下一步深入探讨。

2 结果与讨论

2.1 时间分布特征

北运河水系粪源指示微生物时空分布特征如图 2 所示。从时间分布来看, 2016 年 6 月开始北运河水系的大部分断面为劣 V 类水质, 7 月全部断面水



紫色、淡绿色、绿色、橙色和红色分别代表 I、II、III、V 和劣 V 类水质

图 2 北运河水系粪大肠菌群的时空分布特征

Fig. 2 Spatial-temporal distribution of the fecal coliform in the Beiyun River

质均为劣V类,直到9月整个水系中水质好转,但仍以劣V类水质断面居多。从10月开始至次年4月,随着降雨量减少以及水温的下降,粪源微生物的非点源输入量和繁殖速度降低,北运河水系各个断面水质逐渐变好,其中温榆河上段、永引河和清河的粪大肠杆菌群量均下降到 $10^4 \text{ MPN} \cdot \text{L}^{-1}$ 。MPN指最大可能数(most probable number),是通过对样品进行连续系列稀释,加入培养基进行培养,从规定的反应呈阳性管数的出现率,用概率论来推算样品中菌数最相近似的数值的方法。随着北京雨季的提早来临,2017年5月北运河水系各个断面受粪源微生物污染加重,整体呈现V类或劣V类水质。从总量来看,北运河水系大部分断面在丰水期粪大肠杆菌群量超过 $10^5 \text{ MPN} \cdot \text{L}^{-1}$,污染最为严重。主要原因是北京丰水期以短促暴雨为主,降雨频繁且降雨量较大,这种短时强降雨会加重初期冲刷效应,降雨携带大量地表微生物进入受纳水体,从而造成河流中微生物量普遍增加^[17, 18]。此外,丰水期河流水温较高,高温也会引起粪源微生物的繁殖,从而加重微生物污染^[19]。而平水期和枯水期粪大肠杆菌群量约为 $10^3 \sim 10^5 \text{ MPN} \cdot \text{L}^{-1}$,微生物污染相对较轻,且两个时期微生物污染含量差异性较小。这与前人在温榆河水系的分析结果类似^[20]。

2.2 空间分布特征

如图2所示,北运河水系微生物污染呈现出显著的空间分布差异。总体而言,清河下段较清河上游严重,下段出现劣V类水体概率为66.7%,上段为16.7%,凉水河下游水质差于凉水河上游,下游出现劣V类水体概率为79.2%,上游为58.0%,温榆河下游粪源微生物高于温榆河上游,下游出现V类及劣V类水体总概率为95.8%,上游为58.3%,坝河下游比北小河污染严重,坝河下游出现劣V类水体概率为70.8%,北小河为54.2%,凤河上游相较于凤河下游污染较重,凤河上游所有采样结果均为劣V类水体,下游劣V类水体出现概率为41.7%。有研究表明,河流中微生物的污染程度与其周围污水处理厂分布^[21]、土地利用类型等有密切关系^[22, 23]。结合实地调研发现,清河上段、凉水河上段来水主要为污水处理厂的达标排水,河道来水单一,超负荷运转状态导致污水处理厂部分未经处理的污水直排入河^[4]。且清河下段和凉水河中下段位于城郊区域,部分未经处理的雨水和污水存在直排入水体的现象,特别是雨季强降雨时更甚,造成下游断面水质较差。考虑到水系连通性,清河会流入到温榆河下段,由于清河下游粪源微生物污染较为严重,从而使得温榆河下游较上游污染严重;

坝河下游和清河下游类似,也以污水处理厂二级出水为来水,因而比北小河污染更为严重。

从图1土地利用情况来看,永引河下游、莲花河和马草河位于城区,属于城市景观河流;而凤河和凤港减河位于农业区,主要接纳农村污水、养殖场排放废水和农田灌溉退水,由于农村污水处理设施不完善,且农业区会施用大量农家肥^[24],导致雨季农业区域产生的非点源污染严重,凤河和凤港减河常年处于V类或劣V类水质,其粪源微生物污染情况在北运河水系众多断面中相对最为严重。

2.3 关键景观要素分析结果

降雨前后的粪源微生物污染情况如图3所示。降雨后清河下段、莲花河、永引河、马草河、温榆河下段、坝河下段、北小河和凉水河上段监测断面大肠杆菌群量均超过 $10^6 \text{ MPN} \cdot \text{L}^{-1}$ 。其中粪源微生物数量变化较大的断面包括:清河下段、莲花河、永引河、马草河、温榆河下、北小河流、凉水河上

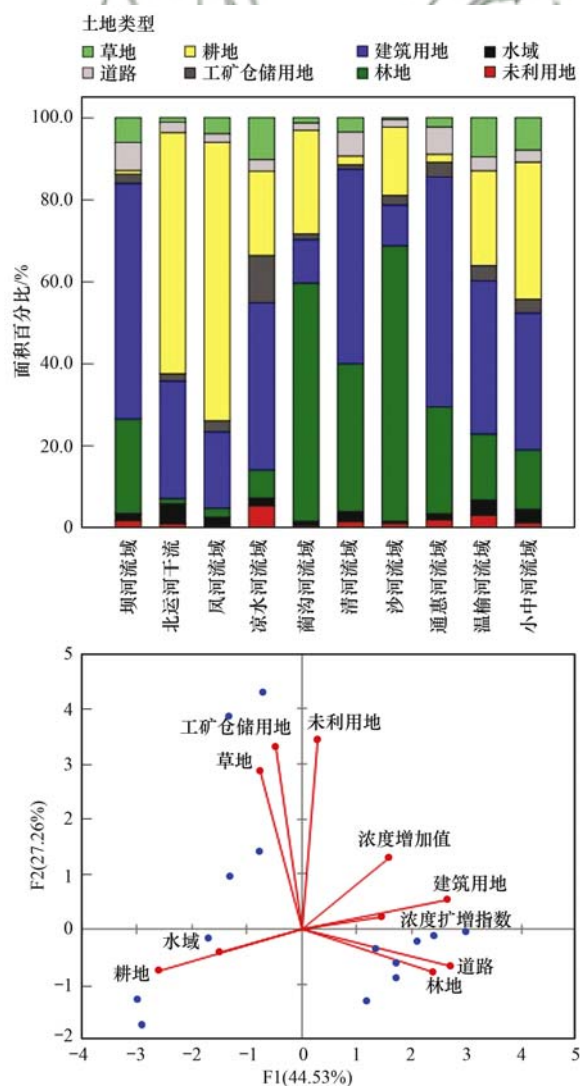


图3 北运河子流域景观要素与粪源微生物变化 Biplot 图

Fig. 3 Landscape elements of the sub-watershed in the Beiyun River and the Biplot of changes in fecal microorganisms

段,甚至永引河、马草河、北小河流等河流断面的粪源微生物数量从 $10^3 \text{ MPN} \cdot \text{L}^{-1}$ 增长为 $10^6 \text{ MPN} \cdot \text{L}^{-1}$,表明非点源污染是北运河水系粪源微生物超标的重要原因。结合子流域景观要素类型比例发现,这些粪源微生物浓度变化较大的断面主要位于城市区域,表明城市河流断面受降雨径流污染影响更大。

利用 Biplot 图对景观要素和粪源微生物浓度增量的相关性进行了定量化分析,结果如图 3 所示。结果表明,粪源微生物浓度增加值、浓度扩增倍数均与建筑用地面积比例这一景观要素相关性最大。原因为城镇化带来人口和建筑用地的增多,人群密集带来微生物来源增加,而不透水面积则使得微生物更易被冲刷进入受纳水体中,引起水体水质的改变^[25]。由此推测,城市非点源污染输出是北运河水系丰水期粪源微生物污染超标的主要原因。

2.4 健康风险评价结果

不同水文期的暴露途径和暴露风险存在差异,通过采样过程中的实际调研,同时参考相关区域前人已有的研究结果,对每种暴露的频次进行分析,并使用公式(1)和(2)进行暴露风险计算。单次暴露的风险数值代表在暴露途径下1 000个人中出现肠胃疾病症状的概率。不同水文期的北运河水系单次暴露健康风险结果如图 4 所示。总体而言钓鱼、游船驾驶、河道保洁、划船、游泳的暴露风险表现为依次递增趋势。划船的暴露频次为 $14.9 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$,主要集中在春季郊游期;钓鱼的暴露频次为 $75.3 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$,主要集中在夏季和秋季;游泳的暴露频次为 $52.1 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$,主要集中在夏季;游船驾驶除去河流冰冻期,暴露频次为 $270 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$;河道保洁因其工作为全年不停歇,故全年暴露于环境危险因子中^[6]。大部分断面在丰水期的单次暴露风险大于平水期,表明丰水期是主要人体健康威胁期,应重点关注。

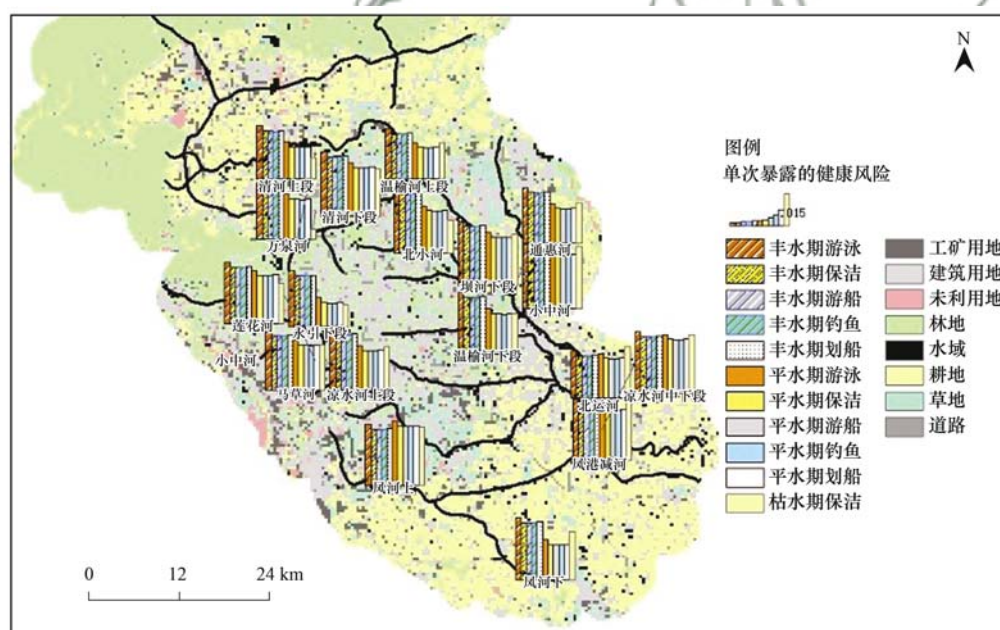


图 4 北运河水系不同水文期单次暴露健康风险

Fig. 4 Health risks of exposure in the Beiyun River during different hydrological periods

凤河上、凤港减河、北运河、凉水河下以及小中河等断面丰水期的单次暴露健康风险与平水期接近,如就游泳来说其单次暴露健康风险平均值分别为 0.035、0.031、0.030、0.032、0.034。而清河上、万泉河、通惠河、北小河以及凤河下等断面丰水期的单次暴露健康风险远远大于平水期,相对平水期其丰水期单次暴露健康风险变化率分别为 23.5%、39.9%、32.4%、27.9%、23.4%。丰水期各个暴露途径的单次暴露健康风险结果如图 5 所示。结果表明,2017 年丰水期,北运河水系粪大肠菌群的单次暴露风险主要在 0.015 ~ 0.035 之间,这与陈晨

等^[10]在 2015 年的分析结果相近。大部分城市河流断面暴露风险高于城郊区域断面,温榆河上游、清河上游、万泉河、永引河、北运河下游等断面暴露风险相对较小,但变化区间较大,说明温榆河上游、清河上游、万泉河、永引河、北运河下断面健康风险并不稳定。然而,坝河下游、北小河、凤港减河、凤河上游、凤河下游、莲花河、凉水河上游、凉水河下游、马草河、清河下游、温榆河下游和小中河等断面的单次暴露的健康风险在 0.025 以上。其中,莲花河、马草河、清河下、温榆河下主要位于城区,人群的接触频次相对较高,考虑到接触频

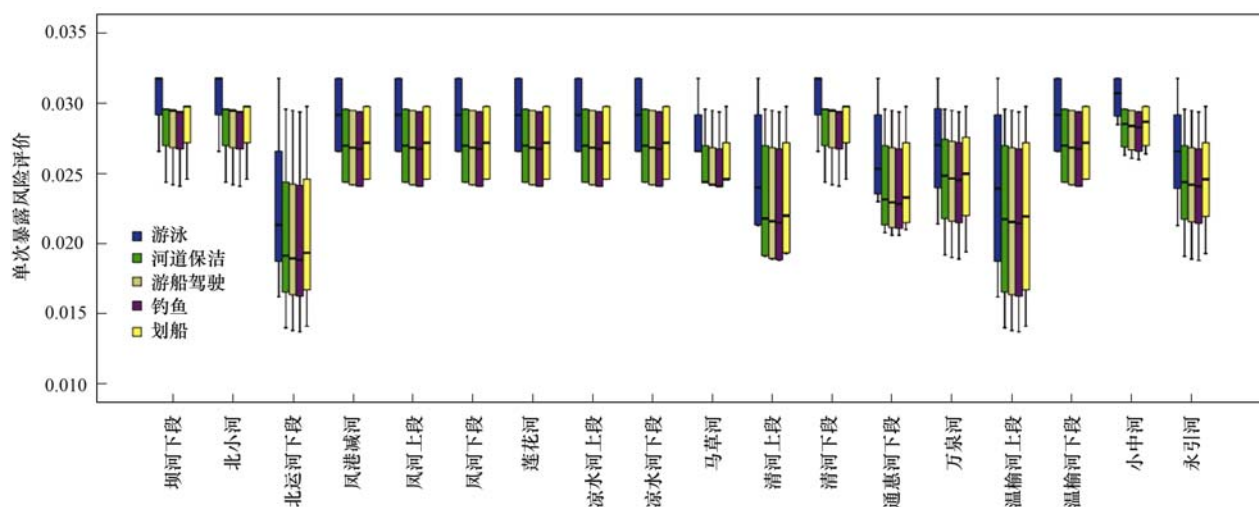


图5 丰水期北运河水系各个断面单次暴露健康风险

Fig. 5 Health risk of exposure for every section of the Beiyun River during the wet season

次,其游泳暴露风险平均值分别为0.777、0.802、0.801、0.797,其钓鱼的暴露风险平均值分别为0.854、0.881、0.877、0.879,其划船的暴露风险平均值分别为0.337、0.355、0.357、0.351,其河道保洁和游船驾驶的暴露风险均接近于1,属于敏感断面,需重点关注。

3 结论

(1)北运河水系丰水期的粪源微生物污染严重,大部分断面属于劣V类水质,平水期和枯水期粪源微生物变化不显著,表明降雨径流引发的非点源污染是北运河粪源微生物的重要来源。

(2)北运河水系粪源微生物污染空间差异明显,农业河段粪源微生物最为严重,城市河段降雨前后粪源微生物含量变化最为明显,建筑用地比例是粪源微生物污染空间分布的重要解释变量。

(3)丰水期是北运河水系的关键健康威胁期,不同的暴露途径的风险排序为游泳>划船>河道保洁>游船驾驶>钓鱼,莲花河、马草河、清河下、温榆河下属敏感断面,需重点关注。

参考文献:

[1] Eregno F E, Tryland I, Tjomsland T, *et al.* Quantitative microbial risk assessment combined with hydrodynamic modelling to estimate the public health risk associated with bathing after rainfall events[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **548-549**: 270-279.

[2] 刘建福,陈敬雄,辜时有. 城市黑臭水体空气微生物污染及健康风险[J]. *环境科学*, 2016, **37**(4): 1264-1271.

Liu J F, Chen J X, Gu S Y. Air microbial pollution and health risk of urban black odoriferous water[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(4): 1264-1271.

[3] Ogilvie L A, Nzakizwanayo J, Guppy F M, *et al.* Resolution of habitat-associated ecogenomic signatures in bacteriophage genomes and application to microbial source tracking[J]. *The ISME Journal*, 2017, **12**(4): 942-958.

[4] Cho K H, Pachepsky Y A, Kim M, *et al.* Modeling seasonal variability of fecal coliform in natural surface waters using the modified SWAT[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, **535**: 377-385.

[5] McCarthy D T, Deletic A, Mitchell V G, *et al.* Development and testing of a model for micro-organism prediction in urban stormwater (MOPUS)[J]. *Journal of Hydrology*, 2011, **409**(1-2): 236-247.

[6] Milledge D G, Gurjar S K, Bunce J T, *et al.* Population density controls on microbial pollution across the Ganga catchment[J]. *Water Research*, 2018, **128**: 82-91.

[7] Wang Y W, Chen Y N, Zheng X, *et al.* Spatio-temporal distribution of fecal indicators in three rivers of the Haihe River Basin, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, **24**(10): 9036-9047.

[8] 荆红卫,张志刚,郭婧. 北京北运河水系水质污染特征及污染源分析[J]. *中国环境科学*, 2013, **33**(2): 319-327.

Jing H W, Zhang Z G, Guo J. Water pollution characteristics and pollution sources of Bei Canal river system in Beijing[J]. *China Environmental Science*, 2013, **33**(2): 319-327.

[9] Zhi X S, Chen L, Shen Z Y. Impacts of urbanization on regional nonpoint source pollution: case study for Beijing, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, **25**(10): 9849-9860.

[10] 陈晨,王曼娜,王江权,等. 基于指示菌的温榆河微生物健康风险评估[J]. *环境科学学报*, 2017, **37**(8): 3177-3184.

Chen C, Wang M N, Wang J Q, *et al.* Health risk assessment based on indicator microorganisms in Wenyu River[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, **37**(8): 3177-3184.

[11] Soller J A, Schoen M, Steele J A, *et al.* Incidence of gastrointestinal illness following wet weather recreational exposures: Harmonization of quantitative microbial risk assessment with an epidemiologic investigation of surfers[J]. *Water Research*, 2017, **121**: 280-289.

[12] 王阳,徐明芳,耿梦梦,等. 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[J]. *环境科学*, 2017, **38**(5): 1842-1851.

Wang Y, Xu M F, Geng M M, *et al.* Health risk assessment of microcystins from drinking water source by Monte Carlo simulation method[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(5): 1842-1851.

- [13] 张雅洁, 李珂, 朱浩然, 等. 北海湖微生物群落结构随季节变化特征[J]. 环境科学, 2017, **38**(8): 3319-3329.
Zhang Y J, Li K, Zhu H R, *et al.* Community structure of microorganisms and its seasonal variation in Beihai Lake [J]. Environmental Science, 2017, **38**(8): 3319-3329.
- [14] 张振兴, 王江权, 郑祥. 水体病原微生物定量风险评估: 历史、现状与发展趋势[J]. 环境科学学报, 2016, **36**(1): 2-15.
Zhang Z X, Wang J Q, Zheng X. Quantitative microbial risk assessment of waterborne pathogens: history and progress [J]. Journal of Environmental Science, 2016, **36**(1): 2-15.
- [15] Lapen D R, Schmidt P J, Thomas J L, *et al.* Towards a more accurate quantitative assessment of seasonal *Cryptosporidium* infection risks in surface waters using species and genotype information[J]. Water Research, 2016, **105**: 625-637.
- [16] 孙傅, 沙婧, 张一帆, 等. 城市景观娱乐水体微生物风险评估[J]. 环境科学, 2013, **34**(3): 933-942.
Sun F, Sha J, Zhang Y F, *et al.* Microbial risk assessment of urban water bodies for aesthetical and recreational uses [J]. Environmental Science, 2013, **34**(3): 933-942.
- [17] Passerat J, Ouattara N K, Mouchel J M, *et al.* Impact of an intense combined sewer overflow event on the microbiological water quality of the Seine River[J]. Water Research, 2011, **45**(2): 893-903.
- [18] Chen L, Zhi X S, Shen Z Y, *et al.* Comparison between snowmelt-runoff and rainfall-runoff nonpoint source pollution in a typical urban catchment in Beijing, China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, **25**(3): 2377-2388.
- [19] Nowicka-Krawczyk P, Żelazna-Wieczorek J. Dynamics in cyanobacterial communities from a relatively stable environment in an urbanised area (ambient springs in Central Poland) [J]. Science of the Total Environment, 2017, **579**: 420-429.
- [20] 杨勇, 魏源送, 郑祥, 等. 北京温榆河流域微生物污染调查研究[J]. 环境科学学报, 2012, **32**(1): 9-18.
Yang Y, Wei Y S, Zheng X, *et al.* Investigation of microbial contamination in Wenyu River of Beijing [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, **32**(1): 9-18.
- [21] Kirschner A K T, Reischer G H, Jakwerth S, *et al.* Multiparametric monitoring of microbial faecal pollution reveals the dominance of human contamination along the whole Danube River[J]. Water Research, 2017, **124**: 543-555.
- [22] 易鑫, 李娟, 黄京, 等. 北京市 4 种不同污水处理系统中病原菌变化研究[J]. 环境科学学报, 2015, **35**(6): 1759-1767.
Yi X, Li J, Huang J, *et al.* The variety regulation of pathogens in the different process of four wastewater treatment plants in Beijing [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, **35**(6): 1759-1767.
- [23] Cha Y, Park M H, Lee S H, *et al.* Modeling spatiotemporal bacterial variability with meteorological and watershed land-use characteristics[J]. Water Research, 2016, **100**: 306-315.
- [24] Porter K D H, Reaney S M, Quilliam R S, *et al.* Predicting diffuse microbial pollution risk across catchments: The performance of SCIMAP and recommendations for future development[J]. Science of the Total Environment, 2017, **609**: 456-465.
- [25] Jovanovic D, Hathaway J, Coleman R, *et al.* Conceptual modelling of *E. coli* in urban stormwater drains, creeks and rivers [J]. Journal of Hydrology, 2017, **555**: 129-140.

CONTENTS

Influence of Mountain Valley Breeze and Sea Land Breeze in Winter on Distribution of Air Pollutants in Beijing-Tianjin-Hebei Region	LI Qing-chun, LI Ju, ZHENG Zuo-fang, <i>et al.</i> (513)
A Method of Aerosol Particle Number Size Distribution Inversed by PM _{2.5} Mass Concentration in PRD	LI Fei, TAN Hao-bo, DENG Xue-jiao, <i>et al.</i> (525)
Light Absorption and Fluorescence Characteristics of Atmospheric Water-soluble Organic Compounds and Humic-like Substances During the Winter Season in Guangzhou	FAN Xing-jun, YU Xu-fang, CAO Tao, <i>et al.</i> (532)
Source Apportionment and Health Risk Quantification of Heavy Metals in PM _{2.5} in Yangzhou, China	DONG Shi-hao, XIE Yang, HUANGFU Yan-qi, <i>et al.</i> (540)
Pollution Characteristics and Source Analysis of <i>n</i> -alkanes and Saccharides in PM _{2.5} During the Winter in Liaohe City	LIU Xiao-di, MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, <i>et al.</i> (548)
Pollution Characteristics, Dry Deposition Fluxes, and Sources for Atmospheric Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Bosten Lake Watershed	SONG Shi-jie, HUANG Tao, ZHAO Liu-yuan, <i>et al.</i> (558)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in PM _{2.5} of a Concentrated Broiler Feeding Operation	LIU Fei, XU Xia, TU Bo-wen, <i>et al.</i> (567)
Effects of Water Vapor Source and Local Evaporation on the Stable Hydrogen and Oxygen Isotopic Compositions of Precipitation	HU Yong-bo, XIAO Wei, QIAN Yu-fei, <i>et al.</i> (573)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Formation in Atmospheric Deposition in Dianchi Lake and Their Contributions to Lake Loading	REN Jia-guo, JIA Hai-bin, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (582)
Temporal-spatial Distribution of Nitrogen and Phosphorus Nutrients in Lake Taihu Based on Geostatistical Analysis	LÜ Wei-wei, YAO Xin, ZHANG Bao-hua, <i>et al.</i> (590)
Effects of Cyanobacterial Blooms in Eutrophic Lakes on Water Quality of Connected Rivers	YU Mao-lei, HONG Guo-xi, XU Hai, <i>et al.</i> (603)
Contamination and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Sediments of Yilong Lake, Southwest China	LI Xiao-lin, LIU En-feng, YU Zhen-zhen, <i>et al.</i> (614)
Temporal and Spatial Characteristics of Heavy Metals in Suspended Particulate Matter in Pearl River Estuary and Its Influencing Factors	DU Jia, WANG Yong-hong, HUANG Qing-hui, <i>et al.</i> (625)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Microorganism Pollutions in the Beiyun River	CHEN Lei, LI Lei-fang, ZHI Xiao-sha, <i>et al.</i> (633)
Speciation and Transformation of Phosphorus in Sediments During the Redox Cycle	HAO Wen-chao, WANG Cong-feng, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (640)
Effect of Magnetic Zirconium/Iron-Modified Bentonite Addition on Phosphorus Mobilization and Species Transformation in River Sediments	WANG Yan, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (649)
Influence of Calcium Ion Pre-treatment on Phosphate Adsorption onto Magnetic Zirconium/Iron-modified Bentonite	ZHAO Yu-ying, LIN Jian-wei, ZHANG Hong-hua, <i>et al.</i> (658)
Effect of Nitrogen on Magnesium Modified Biochar Adsorption to Phosphorus	ZHI Meng-meng, WANG Peng-fei, HOU Ze-ying, <i>et al.</i> (669)
Removal Performance and Mechanism for Treating Phosphorus in Agricultural Wastewater by Three Adsorbents	WU Lu, LIU Feng, LONG Rui, <i>et al.</i> (677)
Photolysis Mechanism of <i>p</i> -Nitrophenol by Nitrocellulose Membrane in Aqueous Solution	DAI Zhi-feng, ZHAO Tong-qian, YIN Yong-guang, <i>et al.</i> (685)
Preparation of ZnTiO ₃ /TiO ₂ Photocatalyst and Its Mechanism on Photocatalytic Degradation of Organic Pollutants	ZHANG Wen-hai, JI Qing-hua, LAN Hua-chun, <i>et al.</i> (693)
Adsorption and Photocatalytic Removal of Chromium on High-index TiO ₂ Facet	ZHONG De-jian, ZHANG Jian-feng, LI Yao, <i>et al.</i> (701)
Reduction Cooperated Fenton Oxidation of Zero-valent Iron (ZVI) Immobilized in Alginate Microsphere for Degradation of Acid Red B	ZHANG Huan, LI Shuang-shuang, WEI Jun-fu, <i>et al.</i> (708)
Mechanism of Removing Iron and Manganese from Drinking Water Using Manganese Ore Sand and Quartz Sand as Filtering Material	CAI Yan-an, BI Xue-jun, ZHANG Jia-ning, <i>et al.</i> (717)
Preparation of Sulfonated Graphene Oxide Modified Composite Nanofiltration Membrane and Application in Salts Separation	ZHANG Yan-jun, ZHANG Shao-feng, ZHAO Chang-wei, <i>et al.</i> (724)
Purification Efficiency and Mechanism of Integrated Al Salt Flocculation-ultrafiltration Membrane Process	XUE Wen-jing, LI Wen-jiang, LIU Juan, <i>et al.</i> (730)
Threshold Flux and Membrane Fouling Analysis of the Hybrid Pre-ozonation and CNTs Membrane Modification Process	WANG Kai-lun, LIU Fang, GUAN Yu-qi, <i>et al.</i> (738)
Distribution and Removal of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Their Derivatives in SBR/MBBR Process	LIU Shu-hui, TIAN Wei-jun, ZHOU Jian-ren, <i>et al.</i> (747)
Biological Nitrogen Removal Process in a Microbubble-aerated Biofilm Reactor Treating Low C/N Wastewater	LIU Chun, WANG Cong-cong, CHEN Xiao-xuan, <i>et al.</i> (754)
Treatment of Simulated Saline Wastewater from the Coal Chemical Industry Using Ecological Floating Beds Enhanced with Arbuscular Mycorrhiza	DOU Wen-qing, HE Hao, SONG Wen-ping, <i>et al.</i> (761)
Nitrification and Bioaugmentation of Biological Treatment System of Sewage Treatment Plant at High Temperature in Summer	SONG Tian-wei, SHENG Xiao-lin, WANG Jia-de, <i>et al.</i> (768)
Characteristics of Ammonia Adsorption and Kinetics by Nitrifying Sludge Immobilized Pellets	YU De-shuang, LÜ Ting-ting, CHEN Guang-hui, <i>et al.</i> (774)
Nitrite Accumulation Characteristics of Partial Denitrification in Different Sludge Sources Using Sodium Acetate as Carbon Source	BI Chun-xue, YU De-shuang, DU Shi-ming, <i>et al.</i> (783)
Operating Characteristics of a DPR-SNED System Treating Low C/N Municipal Wastewater and Nitrate-containing Sewage	DU Shi-ming, YU De-shuang, BI Chun-xue, <i>et al.</i> (791)
Simultaneous Nitrification and Denitrifying Phosphorus Removal in Continuous Flow Reactor with Intermittent Aeration	ZHAO Zhi-chao, HUANG Jian-ming, LI Jian, <i>et al.</i> (799)
Start-up and Stable Operation of ABR-MBR Denitrifying Phosphorus Removal Process	WEI Jia-min, JIANG Zhi-yun, CHENG Cheng, <i>et al.</i> (808)
Effect of Influent C/N Ratio on the Nutrient Removal Characteristics of SNEDPR Systems	DU Ye-qi, YU De-shuang, ZHEN Jian-yuan, <i>et al.</i> (816)
Carbon and Nitrogen Removal Characteristics of ABR Decarbonization-CANON Coupling Process	LI Tian, YIN Wen, WANG Xin-zhu, <i>et al.</i> (823)
Effect of Aeration Density on Start-up of CANON Process	LI Dong, GAO Xue-jian, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (829)
Adjusting Temperature and Settling Time to Achieve ANAMMOX Particles Rapid Start-up and Stable Operation	LI Hai-ling, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (837)
Effect of C/N and Sludge Concentration on the pH-Regulated Nitrification System	ZHANG Min, WEI Jia-min, HUANG Hui-min, <i>et al.</i> (845)
Growth Features of Water Supply Pipeline Biofilms Based on Active Microorganisms	WANG Yang, ZHU Bin, TONG Jun, <i>et al.</i> (853)
Elevational Distribution Characteristics of Soil Bacterial Community and Enzyme Activities in Mount Huangshan	YAO Lan, HU Li-huang, ZHANG Huan-chao, <i>et al.</i> (859)
Microbial Community Structure Shift during Bioremediation of Petroleum Contaminated Soil Using High Throughput Sequencing	QI Yan-yun, WU Man-li, ZHU Chang-cheng, <i>et al.</i> (869)
Effect of Nitrification on N ₂ O Emissions and Their Environmental Factors in Saline-alkali Wetlands	YANG Qu, GAO Wei-feng, LIU Feng-qin, <i>et al.</i> (876)
Effect of Long-term Dairy Manure Amendment on N ₂ O and NO Emissions from Summer Maize-Winter Wheat Cropping Systems	NIE Huang-hua, ZHANG Jia-sheng, HE Zhou-ming, <i>et al.</i> (885)
Effects of Plastic Film Mulching and Nitrogen Fertilizer Application on N ₂ O Emissions from a Vegetable Field	NI Xue, HAO Qing-ju, CHEN Shi-jie, <i>et al.</i> (893)
Differences and Relationship Between Rhizosphere Characteristics and Methane Emissions of Double-cropping Rice Variety	XIAO Zhi-xiang, FU Zhi-qiang, XU Hua-qin, <i>et al.</i> (904)
Effect of Long-Term Biochar Application on Soil Respiration in Flue-Cured Tobacco Planting Fields in Henan Province	LI Ya-sen, DING Song-shuang, YIN Quan-yu, <i>et al.</i> (915)
Spatial Variability in Soil Respiration Under Different Land Use Patterns in Maocun Village, Guilin	DING Meng-kai, HU Xiao-nong, CAO Jian-hua, <i>et al.</i> (924)
Spatiotemporal Variability and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in a Industrially Developed City	LI Feng, LIU Si-yuan, LI Yan, <i>et al.</i> (934)
Effects of Bentonite on Chemical Forms and Bioavailability of Heavy Metals in Different Types of Farmland Soils	LIN Hai, JIN Xiao-na, DONG Ying-bo, <i>et al.</i> (945)
Characteristics of Soil Organic Carbon and Mineralization with Different Stands in Jinyun Mountain	CHEN Shi-qi, LÜ Sheng, GAO Ming, <i>et al.</i> (953)
Contribution of Root Biomass to Soil Organic Carbon Under Complex Landforms Conditions	ZHANG Yan-jun, GUO Sheng-li, <i>et al.</i> (961)
Transformation and Distribution of Soil Organic Carbon and the Microbial Characteristics in Response to Different Exogenous Carbon Input Levels in Paddy Soil	WANG Ji-fei, TONG Yao-yao, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i> (970)
Analysis of Heavy Metal Pollution and Ecological Risk Assessment on Vegetation Leaves in Baoji City	ZHANG Jun-hui, LIN Qing, JIANG Shan, <i>et al.</i> (978)
Effect of Biochar on Available Heavy Metals During Sewage Sludge Composting and Land Application of Compost	ZHOU Ji, YU Ya-wei, JIANG Yue, <i>et al.</i> (987)
Influence of Sludge Retention Time on the Performance and Stability of Mesophilic Anaerobic Co-digestion of Food Waste with Waste Activated Sludge	YUAN Hong-lin, MA Jing, XING Bao-shan, <i>et al.</i> (994)
Performance of Treating Straw and Animal Manure Mixture by an Integrated Process of Thermo-alkali-bi-enzyme Hydrolysis-anaerobic Digestion and Conditions of High Methane Yield	BIAN Ai-qin, YUAN Ye, ZHANG Lu-lu, <i>et al.</i> (1003)