

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



2020

Vol.41 No.2
第41卷 第2期

目次

基于GAM模型分析中国典型区域网格化PM_{2.5}长期变化影响因素 南洋, 张倩倩, 张碧辉(499)

我国PCDD/Fs网格化大气排放清单 陈露露, 黄韬, 陈凯杰, 宋世杰, 高宏, 马建民(510)

成都平原PM_{2.5}中碳质组分时空分布特征与来源 史芳天, 罗彬, 张巍, 刘培川, 郝宇放, 杨文文, 谢绍东(520)

南京江北新区冬季PM_{2.5}中化学组分的昼夜变化特征及其来源解析 邱晨晨, 于兴娜, 丁铖, 时政, 张瑞芳, 侯思宇, 侯新红(529)

南京北郊四季PM_{2.5}中有机物的污染特征及来源解析 李栩婕, 施晓雯, 马嫣, 郑军(537)

长三角背景点夏季大气PM_{2.5}中正构烷烃和多环芳烃的污染特征和来源解析 薛国艳, 王榕慧, 吴灿, 谢郁宁, 陈玉宝, 李杏茹, 王心培, 李大鹏, 张思, 葛双双, 丁志健(554)

2017年秋季长春市PM_{2.5}中多环芳烃的污染来源及健康风险评价 张艺璇, 曹芳, 郑涵, 张东东, 翟晓瑶, 范美益, 章炎麟(564)

京津冀及周边区域PM_{2.5}叠加沙尘重污染过程特征及预报效果分析 朱媛媛, 高愈霄, 柴文轩, 王帅, 李亮, 王威, 王光, 刘冰, 王晓彦, 李健军(574)

河南省臭氧污染特征与气象因子影响分析 齐艳杰, 于世杰, 杨健, 尹沙沙, 程家合, 张瑞芹(587)

河南省气溶胶光学特性的时空变化特征 张瑞芳, 于兴娜(600)

黑炭气溶胶质谱仪(SP-AMS)分析春季PM_{2.5}中水溶性有机气溶胶 黄雯倩, 陈彦彤, 李旭东, 赵竹子, 马帅帅, 叶招莲, 盖鑫磊(609)

南京市黑炭气溶胶时间演变特征及其主要影响因素 杨晓旻, 施双双, 张晨, 王红磊, 王振彬, 朱彬(620)

连云港不同功能区挥发性有机物污染特征及臭氧生成潜势 乔月珍, 陈凤, 李慧鹏, 赵秋月(630)

挥发性有机物污染控制方案的运行费用效能比较 羌宁, 史天哲, 缪海超(638)

西安市大气降水污染和沉降特征及其来源解析 丁铖, 于兴娜, 侯思宇(647)

4种动物养殖场空气中抗生素耐药菌的多样性及群落结构 沙云菲, 孙兴滨, 辛文鹏, 高浩泽, 程首涛, 高敏, 王旭明(656)

辽宁省2000~2030年机动车排放清单及情景分析 金嘉欣, 孙世达, 王芃, 林应超, 王婷, 吴琳, 魏宁, 常俊雨, 毛洪钧(665)

国六柴油机DPF再生时VOCs排放特性 钱枫, 薛常鑫, 许小伟, 马东, 李朋, 祝能(674)

南小水流域地表水和地下水的稳定同位素和水化学特征及其指示意义 郭亚文, 田富强, 胡宏昌, 刘亚平, 赵思晗(682)

乐安河中下游重金属时空分布特征及风险评价 余杨, 吕雅宁, 王伟杰, 渠晓东, 刘聚涛, 温春云(691)

温榆河水环境质量与浮游植物群落结构的时空变化及其相互关系 朱利英, 陈媛媛, 刘静, 王亚炜, 王春荣, 魏源送, 张育新(702)

新安江水库河口区水质及藻类群落结构高频变化 笪文怡, 朱广伟, 黎云祥, 吴志旭, 郑文婷, 兰佳, 王裕成, 许海, 朱梦圆(713)

环渤海芦苇湿地磷的吸附容量及释放风险评估 宋佳伟, 徐刚, 张扬, 吕迎春(728)

洱海藻类水华高风险期沉积物氮磷释放通量时空变化 刘思儒, 赵继东, 肖尚斌, 倪兆奎, 王圣瑞(734)

西安市降雪中DOM荧光特性和来源分析 杨毅, 韩丽媛, 刘焕武, 雷颖, 李斌, 徐会宁(743)

透水砖铺装的设施构造对运行效果的影响 张佳炜, 刘勇, 金建荣, 李田(750)

微米SiC/石墨烯复合物光催化降解罗丹明B 朱红庆, 杨兵, 魏世强, 杨静静, 张进忠(756)

锰铁改性针簇莫来石对水中BPA和EE2的去除 周秋红, 龙天渝, 何靖, 郭劲松, 高俊敏(763)

载钼磁性水热生物炭的制备及其除磷性能 宋小宝, 何世颖, 冯彦房, 花昀, 唐婉莹, 朱秋蓉, 薛利红, 杨林章(773)

复合金属改性生物炭对水体中低浓度磷的吸附性能 孙婷婷, 高菲, 李莉, 黎睿, 董勇(784)

磁性硅藻土负载纳米氧化钙对水中磷酸盐吸附 徐楚天, 李大鹏, 张帅, 耿雪, 陈丽媛, 宋小君, 郭超然, 黄勇(792)

污水厂尾水受纳河段沉积物磷形态及释放风险效应 汤宁, 李如忠, 王聿庆, 何瑞亮, 刘超(801)

生物膜生态浮床对城市尾水净化特征分析 赵志瑞, 张佳瑶, 李铎, 李方红(809)

磁凝凝对市政污水中抗生素抗性基因和重金属抗性基因的削减效能 于雯超, 郑利兵, 魏源送, 王哲晓, 张鹤清, 黄光华, 焦赞仪, 吴振军(815)

四环素抗生素对污泥中四环素抗性基因丰度和表达水平的作用影响 阮晓慧, 钱雅洁, 薛罡, 高品(823)

异养硝化细菌*Pseudomonas aeruginosa* YL的脱氮过程及N₂O产生特性 杨垒, 崔坤, 任勇翔, 郭淋凯, 张志昊, 肖倩, 陈宁, 汪旭晖(831)

包埋厌氧氨氧化菌的环境因子影响特性及群落结构分析 王晓瞳, 杨宏, 苏扬, 刘旭妍(839)

包埋反硝化填料强化二级出水深度脱氮性能研究及中试应用 周亚坤, 杨宏, 王少伦, 何海超, 刘宗跃, 苏扬, 张辉(849)

厌氧时间对间歇进水-间歇曝气的好氧颗粒污泥系统影响 张杰, 王玉颖, 李冬, 曹思雨, 李帅(856)

除磷颗粒诱导的同步短程硝化反硝化除磷颗粒污泥工艺 李冬, 刘博, 王文琪, 张杰(867)

桂西南地球化学异常区农田重金属空间分布特征及污染评价 王佛鹏, 肖乃川, 周浪, 庞瑞, 宋波(876)

青藏高原表土重金属污染评价与来源解析 杨安, 王艺涵, 胡健, 刘小龙, 李军(886)

黄河三角洲不同植物群落土壤酶活性特征及影响因子分析 莫雪, 陈斐杰, 游冲, 刘福德(895)

管理措施对黄土高原油松人工林土壤水溶性碳氮及其三维荧光特征的影响 宋亚辉, 张娇阳, 刘鸿飞, 薛蕙, 李秧秧(905)

生物炭输入对不同滨岸带土壤营养元素有效态变化的影响 周慧华, 袁旭音, 熊钰婷, 韩年, 叶宏萌, 陈耀祖(914)

水热炭减少稻田氨挥发损失的效果与机制 余姗, 薛利红, 花昀, 李德天, 谢斐, 冯彦房, 孙庆业, 杨林章(922)

接种菌根真菌对湿生植物根际土壤硝化反硝化活性的影响及其微生物机制 刘焱, 王磊, 曹湛波, 段灏(932)

基于漂浮箱法和扩散模型测定淡水养殖鱼塘甲烷排放通量的比较 胡涛, 黄健, 丁颖, 孙志荣, 徐梦凡, 刘树伟, 邹建文, 吴双(941)

超高效液相色谱串联质谱法同时测定叶菜中13种抗生素 陈乾, 刘洋, 肖丽君, 邹德玉, 刘海学, 吴惠惠(952)

青菜中镉的吸收和累积对晒的响应规律 余焱, 罗丽韵, 刘哲, 付平南, 李花粉(962)

两种不同镉富集能力油菜品种耐性机制 卞建林, 郭俊梅, 王学东, 杨俊兴, 杨军, 陈同斌, 曹柳, 成永霞, 任战红, 王杰, 周小勇(970)

可生物降解螯合剂GLDA强化三叶草修复镉污染土壤 贺玉龙, 余江, 谢世前, 李佩柔, 周宽, 何欢(979)

我国畜禽粪便重金属含量特征及土壤累积风险分析 穆虹宇, 庄重, 李彦明, 乔玉辉, 陈清, 熊静, 郭丽莉, 江荣风, 李花粉(986)

畜禽粪便和桃树枝工业化堆肥过程中微生物群落演替及其与环境因子的关系 蔡涵冰, 冯雯雯, 董永华, 马中良, 曹慧锦, 孙俊松, 张保国(997)

4种粪便堆肥过程中抗生素的降解特性 朱为静, 朱凤香, 王卫平, 洪春来, 姚燕来(1005)

《环境科学》征订启事(553) 《环境科学》征稿简则(655) 信息(664, 755, 885)

温榆河水环境质量与浮游植物群落结构的时空变化及其相互关系

朱利英^{1,2}, 陈媛媛^{2,3}, 刘静⁴, 王亚炜², 王春荣¹, 魏源送^{2,5,6*}, 张育新⁴

(1. 中国矿业大学(北京)化学与环境工程学院, 北京 100083; 2. 中国科学院生态环境研究中心环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100085; 3. 中国矿业大学环境与测绘学院, 徐州 221116; 4. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085; 5. 中国科学院生态环境研究中心水污染控制实验室, 北京 100085; 6. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 温榆河是北京市重要的生态廊道。本研究基于历史文献资料和现场调查, 比较分析了2006、2011和2018年温榆河水环境质量与浮游植物群落结构的时空变化, 探讨了浮游植物群落变化与水温 T 、溶解氧 DO、pH 和营养盐之间的相互关系。结果表明, 温榆河水环境质量总体好转, 经历了重度污染→污染遏制→水质改善过程, 水污染物已从 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为主转向 TN 为主。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN 的平均浓度和平均超标倍数从2011年的 15.52 ~ 19.16 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、9.34 ~ 8.58 倍和 20.21 ~ 19.58 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、12.47 ~ 8.79 倍降低到2018年的 1.93 ~ 2.66 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、0.29 ~ 0.33 倍和 5.66 ~ 6.79 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、2.77 ~ 2.39 倍, 并且温榆河和支流清河的 DO 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度已基本达到水功能区划目标。与水质改善过程相对应, 浮游植物群落的物种种类大幅增加, 经历了绿藻门(Chlorophyta)→蓝藻门(Cyanophyta)→硅藻门(Bacillariophyta)物种为主的变化过程, Shannon-Wiener 多样性指数(H')、均匀度 Pielou 指数(J)有所改善, 但依然存在高耐污绝对优势物种小环藻(*Cyclotella*)和直链藻(*Melosira*)等, 且2018年温榆河依旧处于中富营养化状态。统计分析结果表明, DO、pH、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN 和 TP 是影响温榆河流域浮游植物多样性和蓝藻、硅藻及其他藻类密度的主要因素。

关键词: 温榆河; 水环境质量; 浮游植物; 时空变化; 多样性指数

中图分类号: X171.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)02-0702-11 DOI: 10.13227/j.hjkk.201906207

Spatio-temporal Evolution and Relationship of Water Environment Quality and Phytoplankton Community in Wenyu River

ZHU Li-ying^{1,2}, CHEN Yuan-yuan^{2,3}, LIU Jing⁴, WANG Ya-wei², WANG Chun-rong¹, WEI Yuan-song^{2,5,6*}, ZHANG Yu-xin⁴

(1. School of Chemical & Environmental Engineering, China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China; 2. State Key Joint Laboratory of Environment Simulation and Pollution Control, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 3. School of Environmental Science and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 4. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 5. Laboratory of Water Pollution Control, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 6. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The Wenyu River is an important ecological corridor of Beijing. In this study, the spatio-temporal dynamics of water quality and phytoplankton community in the Wenyu River in 2006, 2011, and 2018, as well as their relationship were thoroughly analyzed by historical data analysis and field surveys. Results show that the water quality in the Wenyu River improved significantly from serious pollution owing to pollution containment. The major water pollutant has shifted from ammonia nitrogen ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) to total nitrogen (TN). Compared with 2011, the average multiple of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and total nitrogen TN exceeding the national standard were reduced by factors of 0.29-0.33 and 2.77-2.39, respectively, in 2018. The average concentration of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and TN decreased from 15.52-19.16 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ and 20.21-19.58 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ in 2011 to 1.93-2.66 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ and 5.66-6.79 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ in 2018. Moreover, dissolved oxygen (DO) and $\text{NH}_4^+\text{-N}$ concentrations in the Wenyu River and its tributaries, the Qinghe River, almost met requirements of their water function zoning target. Corresponding with the water quality improvement, the phytoplankton and community species increased dramatically. Phytoplankton species increased from 6 to 8 phyla, as well as community species. The dominant species changed from Chlorophyta in 2006 to the Cyanophyta in 2011, then to Bacillariophyta in 2018. The Shannon-Wiener diversity index (H') and evenness Pielou index (J) had improved. However, the major dominant species such as *Cyclotella* and *Melosira* persisted, and the Wenyu River was still in the eutrophication state in 2018. Statistical analysis results indicated that Cyanophyta, Bacillariophyta, and other algae abundance were

收稿日期: 2019-06-28; 修订日期: 2019-09-16

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07102, 2017ZX07102-002)

作者简介: 朱利英(1987~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为水污染控制工程, E-mail: lisaju@126.com

* 通信作者, E-mail: yswwei@cees.ac.cn

significantly correlated with DO, pH, NH_4^+-N , TN, and TP.

Key words: Wenyu River; water environment quality; phytoplankton; spatio-temporal dynamic; biodiversity indices

温榆河是北京市城区主要防洪和排水河道,是中心城区与城市副中心规划蓝网系统的重要连通线,是北运河河湖水系绿色生态走廊的重要组成部分^[1].已有研究表明,1980~2010年间温榆河水环境质量经历了清洁→污染→重度污染-污染遏制的过程,水体耗氧物质从COD为主向 NH_4^+-N 转变,水体黑臭现象基本消失^[2],温榆河流域逐步进入水质改善-水生态系统恢复为主的阶段.为此,北京市在温榆河流域开展了一系列生态环境质量改善工作,如2个“三年行动方案”的水环境治理工作成绩显著,北运河水系劣V类水体占比由2012年^[3]的81.9%降低至2018年^[4]的41.5%,但温榆河水质仍未达到功能区划“上IV下V”的要求,2018年水质仍为劣V类^[5].

浮游植物是一类具有叶绿素、自营养生活、无根茎叶分化的低等植物,是水生态系统中物质代谢和能量循环的初级生产者^[6],是水体富营养化状态的重要指示指标^[7],因此,浮游植物广泛应用于河流、湖泊等水质评价^[8].目前,国内众多学者已在温榆河流域开展了大量有关水环境、水资源和水生态的研究工作,例如,污染物减排和水环境容量分析^[9,10]、水质水量模型分析^[11-13]和水环境质量^[14-16]及时空演变特征分析^[2,15]等.2006年华振玲等^[17]对温榆河流域浮游植物进行了监测,后续研究除对浮游植物群落结构及丰度进行监测外^[18],增加了其与水环境因子的相关分析^[19],但现有研究只是监测当年/当季的温榆河浮游植物群落变化,缺乏长时间系列对温榆河浮游植物群落演变过程及其与水环境质量相互关系的研究.因此,本研究结合历史数据和现场调研,分析2006、2011和2018年温榆河流域水环境质量演变和浮游植物群落结构、丰度等变迁,揭示温榆河流域水环境质量和浮游植物群落结构的时空演变特征及其相关关系,以期为今后温榆河流域水生态修复和建设北运河绿色生态走廊提供科技支撑.

1 材料与方法

1.1 研究区域

温榆河是唯一一条发源于北京境内且常年有水的河流,在通州北关拦河闸入北运河,流域面积约2478 km².干流以沙子营为界,沙河水库至沙子营为温榆河上段,长约23.0 km;沙子营至北关闸为温榆河下段,长约24.5 km.清河、坝河是温榆河下段

的主要水量补给支流,年径流量分别占温榆河总径流量的40.65%和30.03%^[13],是北京市中心城区主要排水河道(图1).

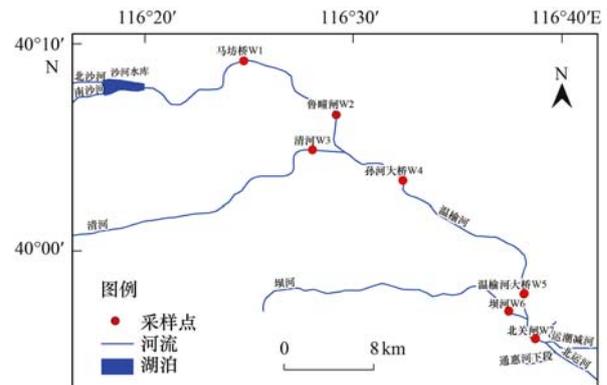


图1 2011年和2018年温榆河采样点分布示意

Fig. 1 Map of sampling sites in Wenyu River

1.2 数据来源、现场调研

2006年水质与浮游植物的数据来源于文献^[17],2011年及2018年水质与浮游植物的数据来源于本研究现场调研和采样分析.2006年及2011年温榆河、清河和坝河的水质类别数据来源于文献^[20],2018年上述数据来源于北京市生态环境局水环境质量发布平台^[5].

结合温榆河水文、地形地貌等信息,本研究在2011年、2018年沿河布设了7个采样点,其中采样点1、4、7与文献^[17]的采样点相同.采样点设置原则:在干流上段、中段、下段,主要支流汇合口上段、汇合后与干流充分混合处等河段设置采样断面(图1和表1).

2011年7~9月、2018年7~9月每月一次采样分析温榆河水质.前期研究表明,温榆河1980~2010年耗氧物质由COD向 NH_4^+-N 转变^[2],且1980~2006年河水水化学特征呈盐渍化趋势^[15],因此本研究增加溶解氧DO和pH指标以分析温榆河水水质变化.现场采用多功能水质检测仪(HQ43d,德国WTW)测定水温 T 、溶解氧DO、pH和电导率;实验室采用分光光度法(DR2800,美国HACH)测定COD,采用连续流动注射分析仪(SAN++,荷兰SKALAR)测定氨氮 NH_4^+-N 、总氮TN和总磷TP等理化指标,每个指标重复测定3次.

2011年7月和2018年7~9月每月一次采样分析温榆河浮游植物.采用1L有机玻璃采水器收集,因不同采样点的河流水深不同(范围0.8~2.3 m),故统一采集表层0.5 m处^[21]水样各5 L,混合均匀,

取混合水样 1 L,现场加鲁哥氏碘液 10 ~ 15 mL 固定;样品运输至实验室,室温静置 24 ~ 48 h 后,虹吸

去上清液后定容至 30 mL,用 0.1 mL 计数框在显微镜下进行定性和定量计数分析^[22,23]。

表 1 采样点基础信息¹⁾

Table 1 Basic information on sampling sites

采样点	简称	经度/(°)	纬度/(°)	河段	水功能区划目标 ¹⁾
W1	马坊桥	116.412 292	40.152 9	温榆河上段	IV类
W2	鲁疃闸	116.494 904	40.111 36	温榆河上段	IV类
W3	清河下段	116.494 142	40.080 23	清河下段	V类
W4	孙河大桥	116.546 23	40.057 906	温榆河下段	V类
W5	温榆河大桥	116.642 983	39.947 22	温榆河下段	V类
W6	坝河下段	116.642 801	39.950 592	坝河下段	V类
W7	北关闸	116.662 467	39.924 095	温榆河下段	V类

1)水功能区划按照《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)进行划分,具体的河段目标参考文献[5]

1.3 数据分析

数据采用 Excel 2016 分析,采用 SPSS 17.0、R 语言 corrplot 函数程序包进行统计分析, ArcGIS 10.6 制图。

采用优势度指数(Y)、Shannon-Wiener 多样性指数(H')、Pielou 均匀度指数(J)^[24~26]描述浮游植物群落特征,计算公式如下。

优势度:

$$Y = \frac{n_i}{N} \times f_i$$

多样性指数(Shannon-Wiener 多样性指数):

$$H' = - \sum_{i=1}^S p_i \ln p_i$$

Pielou 均匀度指数:

$$J = \frac{H'}{\ln S}$$

式中, n_i 为*i*种的个体数, f_i 为该种在所有样品中出现的频率, $p_i = n_i/N$, N 为所有种类总个体数, S 为物种数。若某一物种的 $Y \geq 0.02$,则认定该物种为优势种^[27]。

应用优势度(Y)判断浮游植物优势种;Shannon-Wiener 生物多样性指数(H')和 Pielou 均匀度指数(J)评估水体营养状态^[28]。多样性指数 $0 < H' < 1$,重污型; $1 < H' < 2$, α -中污型; $2 < H' < 3$, β -中污型。均匀度指数 $0 < J < 0.3$,重污型; $0.3 < J < 0.5$,中污

型; $0.5 < J < 0.8$,为清污型。

以 2011 年和 2018 年的浮游植物 Shannon-Wiener 多样性指数(H')、均匀度指数(J)、主要群落密度(绿藻、蓝藻、硅藻和其他藻类)与 8 项水环境因子(水温 T 、DO、pH、COD、 NH_4^+ -N、TN、TP、TN/TP)为原始数据矩阵,采用 Pearson 相关分析计算浮游植物与水环境因子的相关性。

2 结果与分析

2.1 水环境质量时空演变特征

从表 2 可知,温榆河干流及其主要支流清河、坝河的水环境质量明显改善,温榆河水水质经历了重度污染→污染遏制→水质改善的过程。2006 和 2011 年温榆河、清河和坝河的水质污染严重,污染程度依次为坝河 > 温榆河 > 清河;2018 年支流清河已基本达到水功能区划目标,温榆河、坝河的汛期(6~9 月)水质劣于非汛期,部分非汛期水质可达到水功能区划目标^[5]。如表 3 所示,TN、 NH_4^+ -N 和 COD 是目前温榆河主要超标指标,且水污染物指标从 NH_4^+ -N 为主转向 TN 为主。已有研究表明,2006 年温榆河上段 COD 超标率在 90% 以上, NH_4^+ -N 年均值超标 12.9 倍;下段 NH_4^+ -N 年均值超标 6.4 倍^[20]。与 2011 年相比,2018 年 COD 超标倍数较为稳定,而 NH_4^+ -N、TN、TP 浓度和超标倍数均明显下

表 2 2006、2011 和 2018 年温榆河、清河和坝河水水质变化¹⁾

Table 2 Water quality changes of Wenyu River, Qinghe River, and Bahe River in 2006, 2011, and 2018

年份	温榆河		清河		坝河	
	上段	下段	上段	下段	上段	下段
2006	劣 V	劣 V	劣 V	劣 V	劣 V	劣 V
2011	劣 V3	劣 V3	劣 V1	劣 V3	劣 V3	劣 V3
2018	劣 V2	劣 V1	III	IV	劣 V2	劣 V1
水功能区划目标	IV	V	IV	V	IV	V

1)2006 年和 2011 年温榆河、清河和坝河的水质类别数据来源于文献[20],2018 年上述数据来源于北京市生态环境局水环境质量发布平台^[5];2006 年采用水质类别(I~V)类评价水质,适用标准为《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002);从 2007 年开始,北京市对于不能满足 V 类标准的劣 V 类水体进一步细分为劣 V1 类、劣 V2 类、劣 V3 类和劣 V4 类,划分标准参照《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002)规定的一级限值 A 标准、一级限值 B 标准、二级限值标准和大于二级限值标准

表 3 2006、2011 和 2018 年温榆河主要污染物浓度和超标倍数¹⁾

Table 3 Major pollutant concentrations of Wenyu River in 2006, 2011, and 2018

河段	年份	COD		NH ₄ ⁺ -N		TN		TP	
		浓度 /mg·L ⁻¹	超标 倍数	浓度 /mg·L ⁻¹	超标 倍数	浓度 /mg·L ⁻¹	超标 倍数	浓度 /mg·L ⁻¹	超标 倍数
温榆河上段 (目标水质为Ⅳ类)	2006	13.83(以高锰酸盐指数计)	0.38	15.26	9.17	22.81	14.21	2.02	5.73
	2011	63.63	1.12	15.52	9.34	20.21	12.47	1.55	4.17
	2018	63.67	1.12	1.93	0.29	5.66	2.77	0.42	0.40
温榆河下段 (目标水质为Ⅴ类)	2006	26.23(以高锰酸盐指数计)	0.75	21.01	9.50	24.16	11.08	1.44	2.61
	2011	49.29	0.23	19.16	8.58	19.58	8.79	1.36	2.39
	2018	48.00	0.20	2.66	0.33	6.79	2.39	0.36	—

1) 高锰酸盐指数的Ⅳ类目标取值为 10 mg·L⁻¹, Ⅴ类目标取值为 15 mg·L⁻¹; COD、NH₄⁺-N、TN 和 TP 的Ⅳ类目标取值分别为 30、1.5、1.5 和 0.3 mg·L⁻¹, Ⅴ类目标取值分别为 40、2、2 和 0.4 mg·L⁻¹

降,其中NH₄⁺-N的超标倍数从 8.96 倍降低至 0.31 倍,TN 超标倍数最高,温榆河下段 TP 浓度已达到水功能区划目标.另外研究发现,2006 年和 2011 年温榆河上段水质优于下段,2018 年则相反,这与清河流域污水集中处理设施建设和运行有关,清河再生水厂(设计处理规模 55 万 m³·d⁻¹)和 2015 年完成的清河第二再生水厂(设计处理规模 45 万 m³·d⁻¹)基本实现了清河流域污水收集处理,从而显著改善了温榆河下游水质.

2.1.1 COD 和 NH₄⁺-N

如图 2(a)所示,温榆河 COD 浓度无显著性变化($P > 0.05$),平均值的变化范围为(47.25 ± 5.46) ~ (55.02 ± 9.49) mg·L⁻¹. 2018 年温榆河 COD 浓度最低,均值为(47.25 ± 5.46) mg·L⁻¹,且北关闸采样点达到水功能区目标;2018 年支流清河 COD 浓度最低,均值为(54 ± 17.01) mg·L⁻¹;2018 年支流坝河 COD 浓度为(38.50 ± 9.26) mg·L⁻¹,达到了目标水质要求.总之,温榆河上段各年份间 COD 浓度无显著性差异($P > 0.05$),其中 2018 年浓度最低,均值为(56.37 ± 6.0) mg·L⁻¹;2018 年温榆河下段 COD 浓度在坝河汇入后低于汇入前.

由图 2(b)可知,温榆河的NH₄⁺-N浓度明显下降.从 2006 年的(17.09 ± 1.29) mg·L⁻¹显著下降至 2018 年的(1.92 ± 0.33) mg·L⁻¹ ($P < 0.05$).清河 NH₄⁺-N浓度与温榆河呈现相同的下降趋势,2018 年最低,为(2.19 ± 0.88) mg·L⁻¹;2018 年坝河 NH₄⁺-N浓度为(3.01 ± 1.11) mg·L⁻¹. 2011、2018 年温榆河上段的NH₄⁺-N浓度变化无显著性差异($P > 0.05$),但温榆河下段的NH₄⁺-N浓度显著下降($P < 0.05$),范围为(26.49 ± 3.69) ~ (2.17 ± 0.51) mg·L⁻¹.

2.1.2 TN 和 TP

如图 3(a)所示,温榆河 TN 浓度与NH₄⁺-N浓度变化趋势一致,呈显著下降趋势($P < 0.05$),从 2006

年的(23.71 ± 1.66) mg·L⁻¹下降至 2018 年的(6.34 ± 0.33) mg·L⁻¹. 2018 年清河 TN 浓度范围为 21.43 ~ 8.91 mg·L⁻¹;2018 年坝河 TN 为(7.88 ± 0.79) mg·L⁻¹. 2011、2018 年温榆河上、下段 TN 浓度变化趋势一致,均呈现显著下降趋势($P < 0.05$),范围分别是(22.81 ± 0.66) ~ (5.65 ± 0.17) mg·L⁻¹和(24.16 ± 1.29) ~ (6.79 ± 0.31) mg·L⁻¹.

由图 3(b)可以看出,温榆河 TP 浓度呈显著下降趋势($P < 0.05$),2018 年浓度最低(0.38 ± 0.02) mg·L⁻¹. 2011、2018 年清河 TP 最小浓度为 0.48 mg·L⁻¹,温榆河上、下段 TP 浓度与干流变化趋势一致.

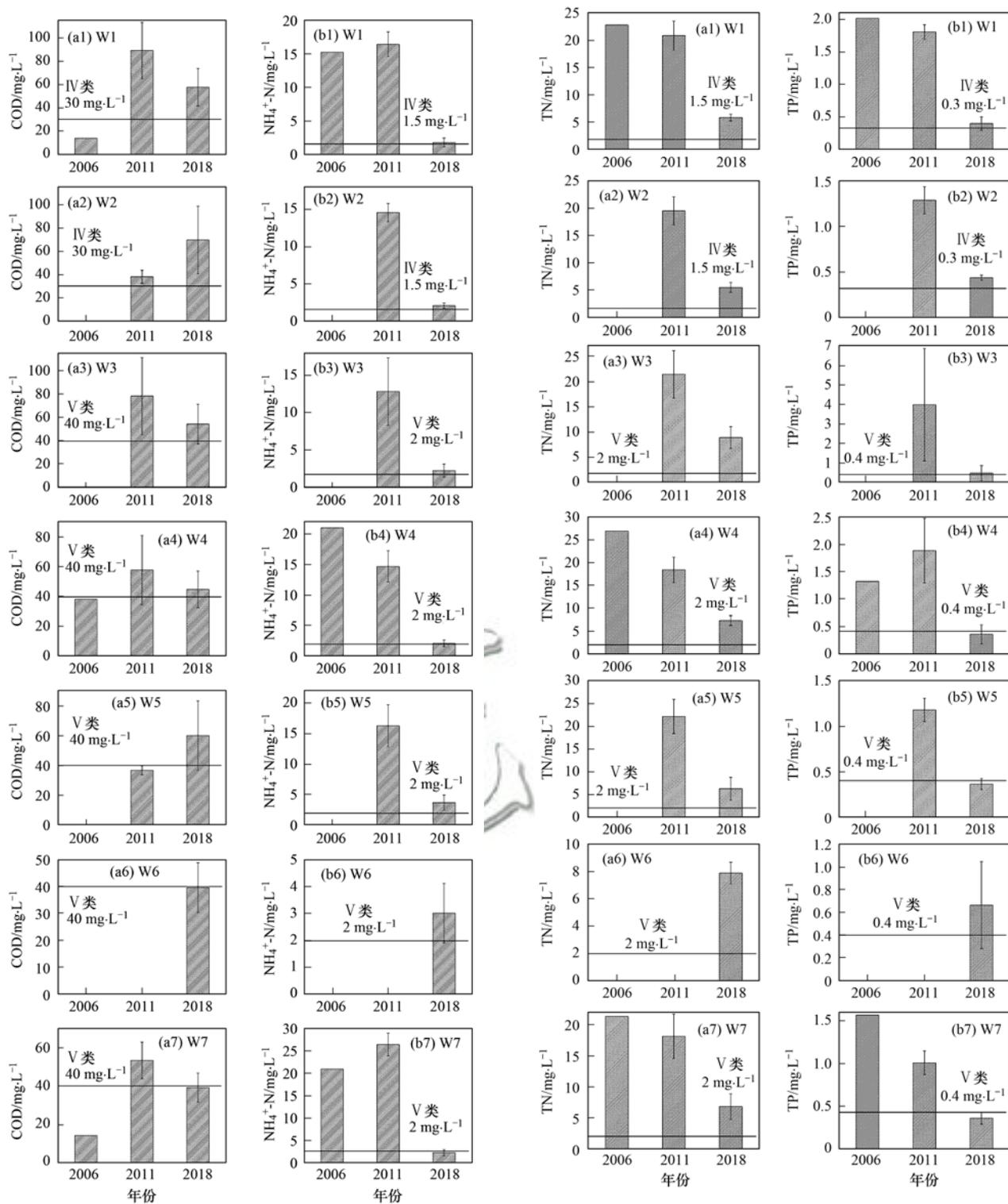
2.1.3 DO 和 pH

从图 4 可知,温榆河、清河和坝河的 DO 浓度和 pH 值升高,且 DO 浓度基本达到了各河段水功能区划目标.温榆河上段 DO 浓度范围为(4.72 ± 2.21) ~ (8.23 ± 1.40) mg·L⁻¹ ($P > 0.05$),温榆河下段 DO 浓度平均值 2018 年最高,为(9.34 ± 0.52) mg·L⁻¹.统计检验结果表明,各年份温榆河干流、温榆河下段的 DO 浓度差异显著($P < 0.05$).

2006、2011 年温榆河 pH 平均值 < 8,变化不显著($P > 0.05$),水体环境处于中性范围,2018 年 pH 平均值为 8.3 ± 0.14,水体环境呈现弱碱性,与 2011 年相比,2018 年 pH 显著升高($P < 0.05$).

2.2 浮游植物群落时空演变特征

从图 5 可知,以 2006 年监测温榆河浮游植物种类为对照,2011 年和 2018 年新增金藻门(Chrysophyta)和黄藻门(Xanthophyta)两大门类,但种类数很少,所占比例最大为 4.08%. 2006、2011 和 2018 年温榆河浮游植物种类组成分布以绿藻门(Chlorophyta)种类最多,2006 年占比最高,为 48%,随年份占比下降,2018 年约为 40.21%. 第二大种类组成存在差异,2006 和 2018 年以硅藻门(Bacillariophyta)为第二大种类,占比分别为 20.9%



(a) 2006年-高锰酸盐指数, 2011年和2018年-COD; (b) NH₄⁺-N

图2 2006、2011和2018年温榆河、清河和坝河的COD和NH₄⁺-N浓度时空演变

Fig. 2 Spatio-temporal evolution of COD and NH₄⁺-N in Wenyu River, Qinghe River, and Bahe River, respectively, in 2006, 2011, and 2018

和32.99%; 2011年蓝藻门(Cyanophyta)和硅藻门占比相同,为18.37%。甲藻门(Pyrrrophyta)在浮游植物种类组成中占比最低,所占比例介于2.67%~

(a) TN, (b) TP
图3 2006、2011和2018年温榆河、清河和坝河的TN、TP浓度时空演变

Fig. 3 Spatio-temporal evolution of total nitrogen and total phosphorus in Wenyu River, Qinghe River and Bahe River, respectively, in 2006, 2011, and 2018

1.04%。2011年和2018年监测的浮游植物种类总数类似,分别为98种和97种,但浮游植物种类组成变化较大,其中硅藻门物种数在2018年增加了约77.8%。

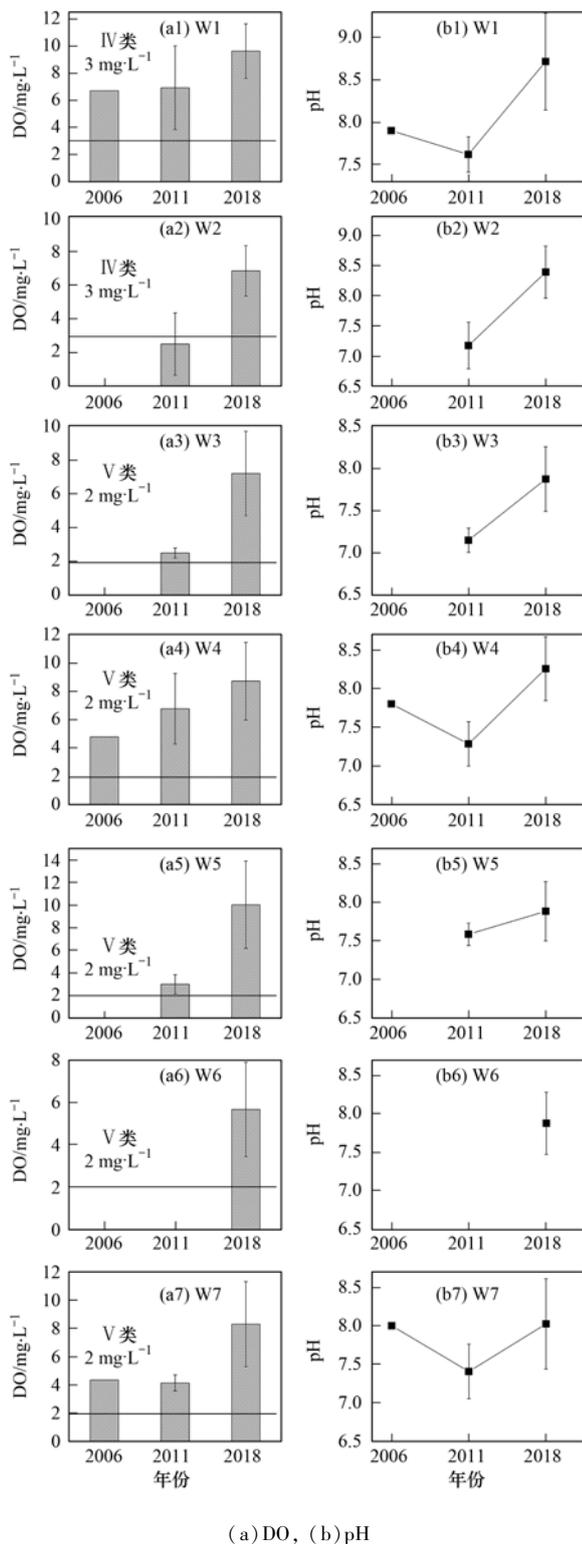


图4 2006、2011和2018年温榆河、清河和坝河的DO浓度、pH值时空演变

Fig. 4 Spatio-temporal evolution of DO and pH in Wenyu River, Qinghe River, and Bahe River, respectively, in 2006, 2011, and 2018

温榆河的浮游植物主要群落密度结果表明(图6), 2011年总细胞密度显著高于其他年份($P < 0.05$). 主要群落密度占比变化剧烈, 绿藻密度2006年最高(74.2%), 但2011年剧烈下降, 密度占比降

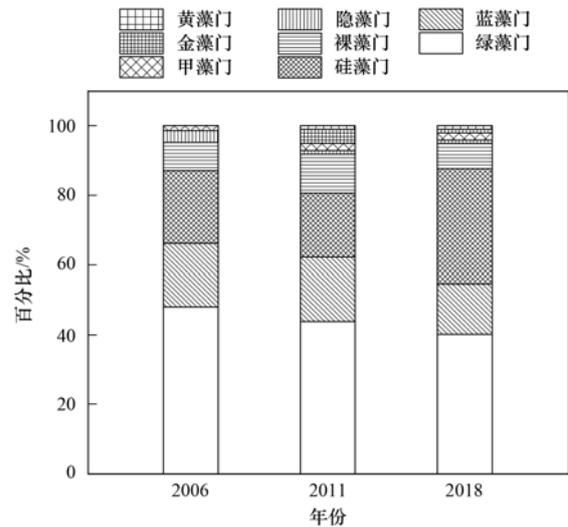


图5 2006、2011和2018年温榆河浮游植物种类组成
Fig. 5 Phytoplankton community composition of Wenyu River in 2006, 2011, and 2018

幅高达587.8%; 与绿藻密度变化相反, 2011年蓝藻密度占比剧增, 较2006年增加5.53倍; 2018年蓝、绿藻的密度下降, 硅藻密度上升, 较2011年增加4.9倍. 2006和2018年温榆河上段浮游植物密度超过下段2倍, 2011年则相反. 支流清河以蓝藻为主, 2011年密度占比高达93.84%, 2018年密度下降, 硅藻密度上升, 为21.5%. 坝河2011年以蓝藻为主, 密度占比约59.4%, 2018年转变为硅藻为主, 涨幅剧烈, 为76%.

2018年温榆河上段以硅藻为主, 密度占比为39.7%, 其次为蓝藻, 密度占比35.9%; 温榆河下段以蓝藻为主, 密度占比为43%, 其次为硅藻, 密度占比为40.8%. 支流清河蓝藻、硅藻的密度略低于支流汇入后的温榆河下段; 支流坝河的硅藻密度略高于支流汇入后的温榆河下段, 而蓝藻则相反, 略低于支流汇入后的温榆河下段.

温榆河上段2011年以蓝藻为主, 其次为绿藻, 密度占比分别为78.4%和17.6%(图6), 优势种共有6种, 以蓝藻门微囊藻优势度最大(表4); 2018年硅藻密度上升, 涨幅高达38.8%, 蓝藻密度下降, 优势种类增多, 以硅藻门勾链藻和小环藻优势度最大, 蓝藻门微囊藻优势度降低; 温榆河下段、清河的浮游植物密度占比与优势种优势度与上段变化趋势一致. 与2011年温榆河上下段、清河优势种以重富营养型水体的指示种类相比, 2018年温榆河浮游植物优势种类明显增多, 除蓝藻门颤藻属、色球藻属外, 硅藻门物种优势度上升.

如图7所示, 2011、2018年温榆河浮游植物Shannon-Wiener多样性指数(H')和均匀度Pielou指

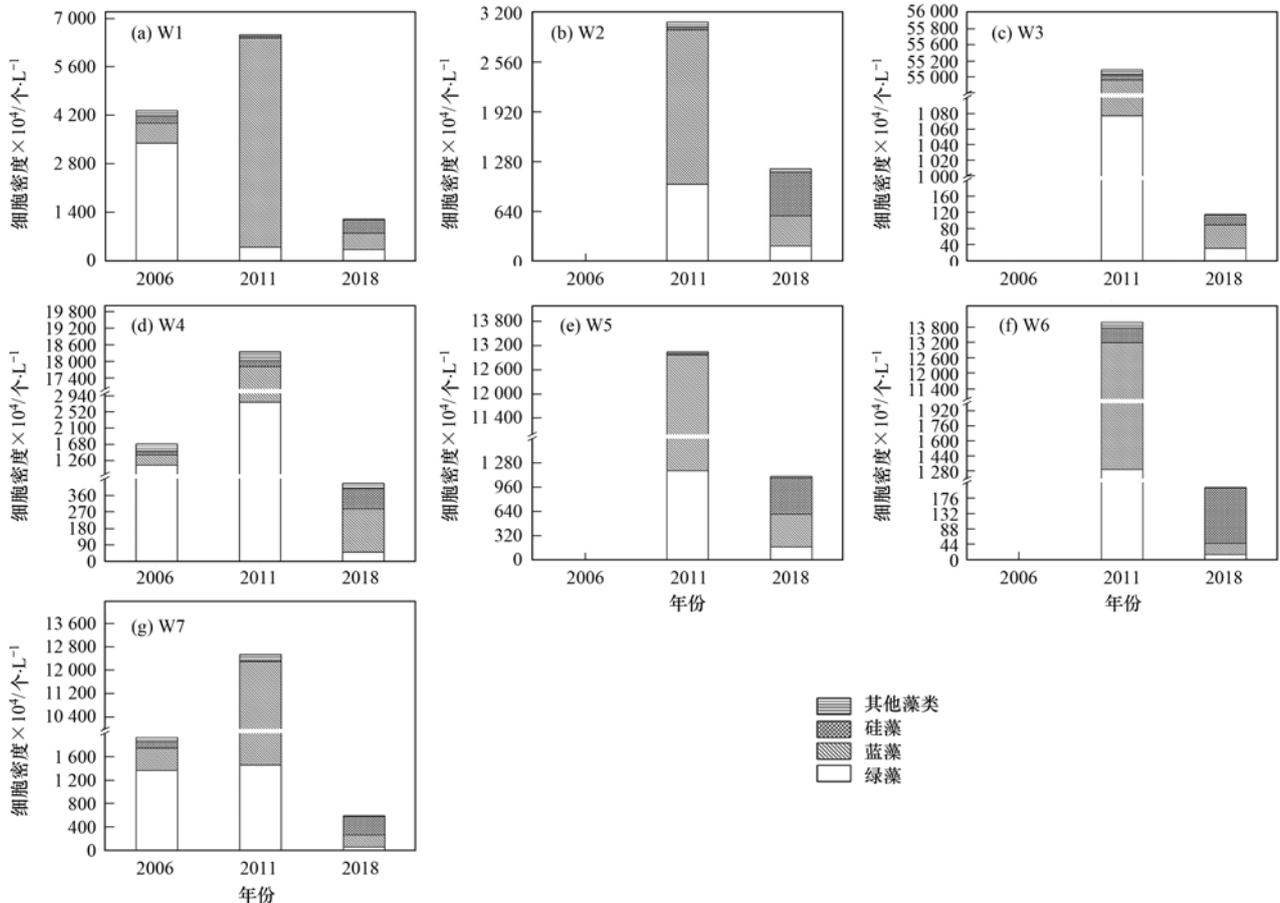


图 6 2006、2011 和 2018 年温榆河浮游植物主要群落密度

Fig. 6 Cell density of main phytoplankton community of Wenyu River in 2006, 2011 and 2018

数(J)总体呈上升趋势, H' 由2011年的1.61上升至2018年的2.21($P < 0.05$), J 由0.58上升至0.69($P > 0.05$).2011年至2018年温榆河由 α -中污型转为 β -中污型;各年份 H' 和 J 温榆河上段 > 下段.

支流清河2011年 H' 和 J 分别为0.52和0.24,属重污型,2018年多样性指数和均匀度指数上升,转变为中污型.坝河在2011年和2018年的 H' 和 J 变化不明显,为中污型.

表 4 2011 和 2018 年温榆河和清河浮游植物优势种

Table 4 Dominant species of phytoplankton in Wenyu River and Qing River, in 2011 and 2018

河段	年份	优势种(Y)
温榆河上段	2011	颤藻(0.05)、微囊藻(0.31)、色球藻(0.09)、小球藻(0.04)、平裂藻(0.02)、肾形藻(0.02)
	2018	颤藻(0.04)、微囊藻(0.05)、节旋藻(0.12)、勾链藻(0.21)、小环藻(0.25)、衣藻(0.02)、盘星藻(0.06)、实球藻(0.02)
温榆河下段	2011	颤藻(0.40)、微囊藻(0.23)、色球藻(0.02)、小球藻(0.03)
	2018	颤藻(0.12)、节旋藻(0.09)、鱼腥藻(0.04)、小环藻(0.52)、盘星藻(0.03)
清河	2011	颤藻(0.20)、微囊藻(0.43)、小球藻(0.02)
	2018	平裂藻(0.16)、小环藻(0.33)、舟形藻(0.03)

2.3 浮游植物群落结构与水环境因子的关系

浮游植物群落指标与水环境因子的相关系数如图8所示. Pearson 相关结果表明,水环境因子对浮游植物群落状态有明显影响,DO、pH和营养盐是主要的影响因素. H' 和 J 与溶解氧DO和pH呈极显著正相关($P < 0.01$),与TP呈显著负相关.绿藻密度与各水环境因子未体现相关性,这与王敏等在太湖西北湖区2003~2012年

监测绿藻丰度与水温呈显著负相关结果不一致^[29].蓝藻密度与DO和pH呈极显著负相关($P < 0.01$),与 NH_4^+ -N、TN和TP浓度呈显著正相关,与TN/TP比值呈显著负相关($P < 0.05$),与蓝藻和水环境因子相关关系相似的是其他藻类密度,同样与DO、TN和TP等相关.而硅藻密度与水温 T 和pH呈显著正相关,与 NH_4^+ -N和TN浓度呈显著负相关($P < 0.05$).

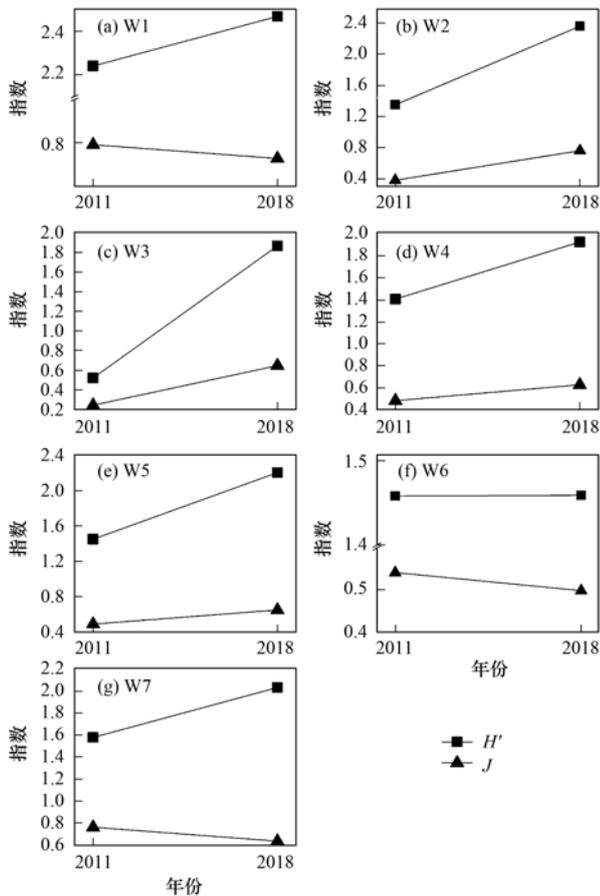


图7 2011和2018年温榆河浮游植物 Shannon-Wiener 多样性指数 (H') 和 Pielou 指数 (J)

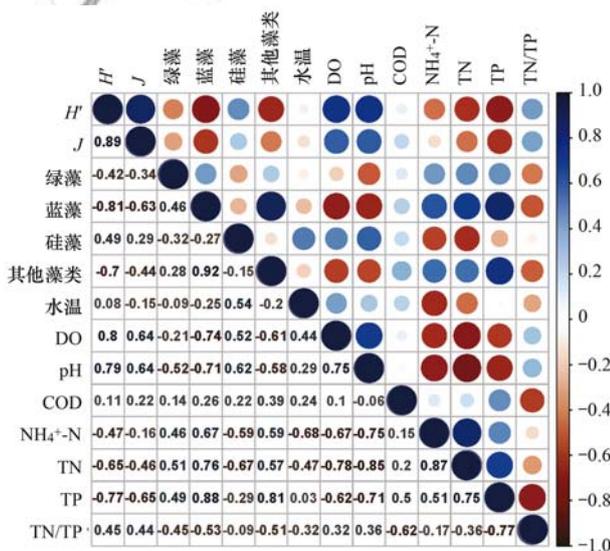
Fig. 7 Diversity index and evenness index of phytoplankton community in Wenyu River in 2011 and 2018

3 讨论

温榆河是北京市重要的生态廊道,尤以 2001 年北京申奥成功后,温榆河流域作为 2008 年奥运会主承载区,北京市加大治理力度,从一系列控源截污、污染减排等工程手段到细化排放标准、编制发布地方排放标准等管理措施实施,多管齐下,改善水环境质量. 根据文献 [30, 31] 和课题组历时 2 a 入河污染物负荷调研^[2]发现, 2007 年温榆河流域生活、农业和集中处理设施排放是主要的污染途径,分别占 COD 总排放量的 31%、35% 和 32%,工业污染源排放仅占 2%. 直接入河污染物占 COD 总排放量的 50% 以上,昌平区、顺义区、朝阳区、通州区 4 个重点区域排污口共计 648 个, COD 排放量占总排放量的 61.5%. 随着北京市在温榆河流域实施沿线截污、河道整治、污水集中处理等一系列工程,与 2007 年相比, 2010 年温榆河干流入河污染负荷已有明显削减, COD 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 分别减少了 $3.08 \times 10^4 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $0.17 \times 10^4 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$,非点源污染输出量对全流域污染贡献比例大大降低,约为 0.86% ~ 8.96%^[30]. 2011 年温榆河黑臭现象彻底消除,流域步入耗氧物质从 COD 向 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 转变的过程^[2], 2018 年温榆河和支流清河的溶解氧 DO 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度已基本实现各河段水功能区划目标,温榆河流域 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 污染已基本得到遏制,并开始向 TN 污染转变.

从 2007 年开始,北京市将劣 V 类水体进一步细化分为劣 V1 类、劣 V2 类、劣 V3 类和劣 V4 类 4 个等级,其划分标准参照《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002)规定的一级限值 A 标准、一级限值 B 标准、二级限值标准和大于二级限值标准^[20]. 自 2015 年 12 月 31 日起,北京市现有中心城区城市污水处理厂执行北京市地方标准《城镇污水处理厂污染物排放标准》(DB 11/890-2012),其中 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TP 等排放限值等同于《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)中的 IV 类标准限值. 温榆河、清河和坝河作为北京市主要城市排水河道,污水集中处理设施排水是其重要补给水源,该标准的实施大大提高了温榆河流域水环境质量. 2007 年流域内已建成运行的污水处理厂 7 座,处理能力 $80.9 \text{ 万 m}^3\cdot\text{d}^{-1}$, 2018 年已建成运行的污水处理厂增加到 19 座,处理能力增加到 $205.08 \text{ 万 m}^3\cdot\text{d}^{-1}$,是 2007 年的 2.53 倍,基本实现了第二个“三年行动方案”2019 年目标,这为温榆河水环境质量改善提供了重要支持.

浮游植物的群落结构、生物量与季节、水环境



蓝色为正相关,红色为负相关;圆圈尺寸和颜色深浅表示相关系数大小,圆圈越大颜色越深表示相关系数越大
图8 浮游植物的多样性指数、均匀度指数和种群密度与水环境因子的 Pearson 相关关系

Fig. 8 Pearson correlations between diversity index/evenness index/phytoplankton abundances and aquatic factors of Wenyu River in 2011 and 2018

质量密切相关^[32],尤其是 N、P 等营养物可显著影响浮游植物的生长^[32, 33]. 与 2006 年全年采样不同的是, 2011 年与 2018 年均均为夏季采样, 采样期间平均水温分别为 $(25.2 \pm 1.15)^\circ\text{C}$ 和 $(26.49 \pm 2.31)^\circ\text{C}$. 2018 年浮游植物密度显著低于 2011 年 ($P < 0.05$), 其原因可能与水体氮磷养分变化有关, 例如, 2011 年温榆河干流 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度是 2018 年的 7.48 倍. 研究表明, 氮素可有效促进浮游植物密度的增加^[33, 34], 其中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 能够促进蓝藻门植物的生长, 而硅藻门和甲藻门植物则优先利用 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ ^[35], 这与本研究调研结果相符, 2011 年蓝藻门植物密度占浮游植物总密度的 80% 以上, 而随着 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度的下降, 2018 年硅藻门浮游植物密度大幅上升, 种类增加约 70% 以上, 这印证了近些年温榆河氮污染已从 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 为主转向 TN 为主.

研究者普遍认为, 不同营养状态的水体存在的生物种类不同, 优势类群的占比可以用于指示水体的污染状态^[21, 36]. 一般来说, 贫营养型水体中浮游植物以金藻、黄藻类为主, 中营养型水体中常以甲藻、隐藻、硅藻类占优势, 重富营养型水体中则常以绿藻、蓝藻类占优势^[22]. 2006、2011 和 2018 年温榆河流域浮游植物的主要优势类群从绿藻逐渐向硅藻过渡, 2018 年硅藻门物种数的增幅高达 70% 以上. 硅藻物种数占比逐年上升说明了温榆河流域水体污染程度逐年减轻, 富营养化状态由重营养转向中营养. 2018 年支流坝河高密度硅藻的汇入导致温榆河北关闸浮游植物硅藻门物种密度高于上段. 相关性分析结果表明, 硅藻密度与 pH 呈显著正相关 ($P < 0.05$), 说明随着水体酸碱度的上升, 硅藻群落密度及优势物种数量上升, 这与 Hulyal 等^[37]报道硅藻门物种通常生活在碱性水体的结论一致. Cvetkoska 等^[38]报道硅藻门植物生长区域变动的驱动因子与 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 TP 有关, 其中小环藻属 (*cyclotella*) 在每个生长分区采样点均有分布, 说明其水体营养状况耐受性较高; Abboud-Abi 等^[39]、Jindal 等^[40] 和 Arab 等^[41] 有类似的研究结论, 认为像隐形舟形藻 (*Navicula cryptocephala*)、菱形藻 (*Nitzschia palea*) 和铁杆藻 (*Synedra ulna*) 等藻类具有高污染负荷的耐污性. 本研究结果表明, 2018 年温榆河流域浮游植物群落以硅藻门为主, 但小环藻、勾链藻、舟形藻等绝对优势物种 ($Y \geq 0.02$) 的存在说明这 10 余年来温榆河水质虽有较大改善, 但目前仍处于中富营养化状态.

相关性分析结果表明, 温榆河干流浮游植物密度及主要类群的变化受到 DO、pH 和营养盐的共同影响. 浮游植物的多样性和均匀度指数不仅与 DO

和 pH 呈显著正相关 ($P < 0.05$, 图 8), 而且随着 DO 和 pH 的升高呈上升趋势 (图 4 和图 7), 这说明 DO 和 pH 值的升高是温榆河干流浮游植物多样性和均匀度增加的重要原因. 这与王振方等^[42] 和杨丽等^[43] 的研究结果一致, 近些年随着北京市河道整治工程的逐步实施, 温榆河、清河、坝河等河道沉水植物逐渐恢复, 植物体光合作用释放的氧气溶解到水体中, 从而增加了 DO 含量, 进一步促进水体中各类浮游植物的生长和繁殖^[44]. 然而当浮游植物物种密度过高时, 植物残体需耗氧分解, 从而降低水体 DO 含量, 因此蓝藻密度及其他藻类密度与 DO 含量呈显著负相关关系, 这与刘静等^[19] 于 2011 年对温榆河及其支流夏季浮游植物群落结构与环境因子的影响研究结果一致. 通过对 2011 年和 2018 年采样点进行指数间相关分析发现, 多样性指数和均匀度指数相关性系数达 0.89, P 远小于 0.01, 由此可推测, 温榆河流域 2011 和 2018 年多样性指数的变动, 可能更多地是由于群落均匀度的变动而不是由于种类数的变化, 即物种丰富度的变化. 这与实际监测 2011 年和 2018 年监测浮游植物种类总数类似的结果一致.

4 结论

(1) 温榆河干流及其主要支流清河、坝河的水环境质量改善明显, 总体经历了重度污染→污染遏制→水质改善过程, 温榆河流域耗氧物质 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 污染已基本得到遏制, 并开始向 TN 污染转变. 2006 年和 2011 年温榆河、清河和坝河的水污染严重, 均未达到水功能区划目标, 水污染程度依次为坝河 > 温榆河 > 清河. 在北京市加强水污染控制和水环境综合治理所采取的一系列政策和工程举措后, 2018 年水质实现质的飞跃, 温榆河和支流清河溶解氧 DO 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度已经基本实现各河段水功能区划目标.

(2) 温榆河的浮游植物门类由 6 门增加至 8 门, 浮游群落物种种类大幅增加. 物种种类组成和密度差异较大, 经历了从 2006 年以绿藻门 (Chlorophyta) 为主、2011 年以蓝藻门 (Cyanophyta) 为主到 2018 年以硅藻门 (Bacillariophyta) 为主的转变, 这说明温榆河水质总体好转, 但高耐污性绝对优势物种小环藻、直链藻等的存在与 Shannon-Wiener 多样性指数 (H') 和均匀度 Pielou 指数 (J) 结果一致表明, 2018 年温榆河流域水体总体上仍处于中富营养化污染状态.

(3) 温榆河流域浮游植物密度及主要类群的变化受 DO、pH 和营养盐的共同影响. 其中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓

度大幅下降导致蓝藻门物种密度下降, 硅藻门物种更适应偏碱性和 NO_3^- -N浓度高的水环境, 这印证了近年来温榆河水体氮污染已经从 NH_4^+ -N为主转向TN为主。

参考文献:

- [1] 北京市规划和自然资源委员会. 北京城市总体规划(2016年-2035年)[R]. 北京: 北京市规划和自然资源委员会, 2017.
- [2] 郁达伟, 于森, 魏源送, 等. 1980~2010年温榆河的水环境质量时空演变特征[J]. 环境科学学报, 2012, **32**(11): 2803-2813.
Yu D W, Yu M, Wei Y S, *et al.* Spatio-temporal evolution of water environment quality in Wenyu River during 1980-2010[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, **32**(11): 2803-2813.
- [3] 北京市环境保护局. 2012年北京市环境状况公报[R]. 北京: 北京市环境保护局, 2013.
- [4] 北京市生态环境局. 2018年北京市生态环境状况公报[R]. 北京: 北京市生态环境局, 2019.
- [5] 北京市生态环境局. 本市河流水质状况[EB/OL]. <http://sthjj.beijing.gov.cn/bjhrb/xxgk/ywdt/hjzlk/shjzl60/bshlszzk/index.html>, 2019-09-24.
- [6] Jindal R, Thakur R K, Singh U B, *et al.* Phytoplankton dynamics and water quality of Prashar Lake, Himachal Pradesh, India[J]. *Sustainability of Water Quality and Ecology*, 2014, **3-4**: 101-113.
- [7] Safonova T A, Shauro S P. Phytoplankton of the Karasuk River (West Siberia) as an indicator of water quality [J]. *Contemporary Problems of Ecology*, 2009, **2**(6): 570-575.
- [8] Vajravelu M, Marfin Y, Ayyappan S, *et al.* Seasonal influence of physico-chemical parameters on phytoplankton diversity, community structure and abundance at Parangipettai coastal waters, Bay of Bengal, South East Coast of India [J]. *Oceanologia*, 2018, **60**(2): 114-127.
- [9] 王刚, 齐珺, 潘涛, 等. 北运河流域(北京段)主要污染物减排措施效果评估[J]. 环境污染与防治, 2016, **38**(6): 39-45.
Wang G, Qi J, Pan T, *et al.* Assessment of emission reduction measures of the main pollutants in the North Canal River (Beijing section) [J]. *Environmental Pollution and Control*, 2016, **38**(6): 39-45.
- [10] 刘明宇, 华路. 温榆河水环境容量分析[J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2008, **29**(3): 80-82, 101.
Liu M Y, Hua L. Analysis on water environment capacity of Wenyu River[J]. *Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition)*, 2008, **29**(3): 80-82, 101.
- [11] 吉利娜 孙凤刚, 付春梅, 等. 北京市北运河2012年“7·21”降雨和2016年“7·20”降雨行洪过程对比分析[J]. 中国防汛抗旱, 2019, **29**(2): 28-31, 35.
Ji L N, Sun F G, Fu C M, *et al.* Comparative analysis of flooding process of “2012. 7. 21” and “2016. 7. 20” rain storm in North Canal of Beijing [J]. *China Flood & Drought Management*, 2019, **29**(2): 28-31, 35.
- [12] 石红梅. 温榆河流域水质水量数学模型[D]. 北京: 清华大学, 2009. 26-50.
Shi H M. Mathematical model of flow and water quality in Wenyuhe basin [D]. Beijing: Tsinghua University, 2009. 26-50.
- [13] 王亚炜, 杜向群, 郁达伟, 等. 温榆河氨氮污染控制措施的效果模拟[J]. 环境科学学报, 2013, **33**(2): 479-486.
Wang Y W, Du X Q, Yu D W, *et al.* Assessment of ammonia nitrogen pollution control in Wenyu River by QUAL2K simulation [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, **33**(2): 479-486.
- [14] 孙文, 王理明, 刘吉宝, 等. 北运河沙河水库沉积物营养盐分布特征及其溯源分析[J]. 环境科学学报, 2019, **39**(5): 1581-1589.
Sun W, Wang L M, Liu J B, *et al.* Nutrients distribution and its sources analysis of sediments in Shahe reservoir of northern canal [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, **39**(5): 1581-1589.
- [15] 于森, 魏源送, 郑祥, 等. 温榆河水化学特征演变及其影响因素分析[J]. 环境科学学报, 2012, **32**(1): 1-8.
Yu M, Wei Y S, Zheng X, *et al.* Evolution of hydro-chemical characteristics of Wenyu River and its influencing factors [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, **32**(1): 1-8.
- [16] 杜晓丽, 曲久辉, 刘会娟, 等. 温榆河水体中重金属含量分布及赋存状态解析[J]. 环境科学学报, 2012, **32**(1): 37-42.
Du X L, Qu J H, Liu H J, *et al.* Distributions of trace metals in the surface water in Wenyu River [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, **32**(1): 37-42.
- [17] 华振玲, 杜桂森, 武佃卫, 等. 北京温榆河浮游藻类与水质分析[J]. 世界科技研究与发展, 2010, **32**(2): 213-215.
Hua Z L, Du G S, Wu D W, *et al.* Analysis on phytoplankton and water quality of Wenyu River in Beijing [J]. *World Sci-Tech R&D*, 2010, **32**(2): 213-215.
- [18] 王汨, 杨柏贺, 孟云飞, 等. 北运河水系夏季浮游植物群落多样性研究[J]. 河北渔业, 2017, (10): 19-21, 31.
- [19] 刘静, 马克明, 张育新, 等. 温榆河夏季浮游植物群落结构及其与环境因子的关系[J]. 水生态学杂志, 2015, **36**(5): 22-28.
Liu J, Ma K M, Zhang Y X, *et al.* Summer phytoplankton community structure in the Wenyu River and its relationship with environmental factors [J]. *Journal of Hydroecology*, 2015, **36**(5): 22-28.
- [20] 北京市环境质量报告书编写组. 北京市环境质量报告书(2011-2015)[R]. 北京: 北京市环境保护局, 2016.
- [21] 孙祥, 朱广伟, 杨文斌, 等. 天目湖沙河水库浮游植物群落结构的时空异质性[J]. 环境科学, 2017, **38**(10): 4160-4168.
Sun X, Zhu G W, Yang W B, *et al.* Spatio-temporal variations in phytoplankton community in Shahe Reservoir, Tianmuhu, China [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(10): 4160-4168.
- [22] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范[M]. (第二版). 北京: 中国环境科学出版社, 1990. 25-32.
- [23] 胡鸿钧, 魏印心. 中国淡水藻类-系统、分类及生态[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [24] 江志兵, 朱旭宇, 高瑜, 等. 象山港春季网采浮游植物的分布特征及其影响因素[J]. 生态学报, 2013, **33**(11): 3340-3350.
Jiang Z B, Zhu X Y, Gao Y, *et al.* Distribution of net-phytoplankton and its influence factors in spring in Xiangshan Bay [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, **33**(11): 3340-3350.
- [25] Belaoussoff S, Kevan P G, Murphy S, *et al.* Assessing tillage disturbance on assemblages of ground beetles (Coleoptera: carabidae) by using a range of ecological indices [J]. *Biodiversity & Conservation*, 2003, **12**(5): 851-882.
- [26] Shannon C E, Wiener W. The mathematical theory of communication [M]. Urbana, IL: University of Illinois Press, 1963. 125-125.
- [27] Lampitt R S, Wishner K F, Turley C M, *et al.* Marine snow studies in the Northeast Atlantic Ocean: distribution, composition

- and role as a food source for migrating plankton [J]. *Marine Biology*, 1993, **116**(4): 689-702.
- [28] 黄祥飞, 陈伟民, 蔡启铭. 湖泊生态调查观测与分析[M]. 北京: 中国标准出版社, 2000. 27-62.
- [29] 王敏, 张建云, 陈求稳, 等. 太湖西北湖区2003-2012年间氮磷浓度及浮游植物主要类群变化趋势分析[J]. *生态学报*, 2019, **39**(1): 164-172.
Wang M, Zhang J Y, Chen Q W, *et al.* Variations in nitrogen and phosphorus concentrations and major phytoplankton species in the northwestern Lake Taihu between 2003-2012 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(1): 164-172.
- [30] 北京市环境保护局. 北京市北运河流域污染状况调研报告[R]. 北京: 北京市环境保护局, 2008.
- [31] 郑凡东, 孟庆义, 王培京, 等. 北京市温榆河水环境现状及治理对策研究[J]. *北京水务*, 2007, (5): 5-8.
Zheng F D, Meng Q Y, Wang P J, *et al.* Study on status and improvement strategies of water environment in Wenyu River of Beijing [J]. *Beijing Water*, 2007, (5): 5-8.
- [32] Pennock J R, Sharp J H. Temporal alternation between light- and nutrient-limitation of phytoplankton production in a coastal plain estuary [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1994, **111**: 275-288.
- [33] Reed M L, Pinckney J L, Keppler C J, *et al.* The influence of nitrogen and phosphorus on phytoplankton growth and assemblage composition in four coastal, southeastern USA systems [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2016, **177**: 71-82.
- [34] Sitta K A, Reed M, Mortensen R, *et al.* The influences of nitrogen form and zooplankton grazing on phytoplankton assemblages in two coastal southeastern systems [J]. *Limnology and Oceanography*, 2018, **63**(6): 2523-2544.
- [35] Leruste A, Pasqualini V, Garrido M, *et al.* Physiological and behavioral responses of phytoplankton communities to nutrient availability in a disturbed Mediterranean coastal lagoon [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2019, **219**: 176-188.
- [36] 郑诚, 陆开宏, 徐镇, 等. 四明湖水库浮游植物功能类群的季节演替及其影响因子[J]. *环境科学*, 2018, **39**(6): 2688-2697.
Zheng C, Lu K H, Xu Z, *et al.* Seasonal succession of phytoplankton functional groups and their driving factors in the Siminghu Reservoir [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(6): 2688-2697.
- [37] Hulyal S B, Kaliwal B B. Dynamics of phytoplankton in relation to physico-chemical factors of Almatti reservoir of Bijapur District, Karnataka State [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2009, **153**(1-4): 45-59.
- [38] Cvetkoska A, Pavlov A, Jovanovska E, *et al.* Spatial patterns of diatom diversity and community structure in ancient Lake Ohrid [J]. *Hydrobiologia*, 2018, **819**(1): 197-215.
- [39] Abboud-Abi Saab M, Hassoun A E R. Effects of organic pollution on environmental conditions and the phytoplankton community in the central Lebanese coastal waters with special attention to toxic algae [J]. *Regional Studies in Marine Science*, 2017, **10**: 38-51.
- [40] Jindal R, Vatsal P. Plankton as biomonitors of saprobity [J]. *Aquaculture*, 2005, **6**(1): 11-16.
- [41] Arab S, Hamil S, Rezzaz M A, *et al.* Seasonal variation of water quality and phytoplankton dynamics and diversity in the surface water of Boukourdane Lake, Algeria [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2019, **12**(2): 29.
- [42] 王振方, 张玮, 杨丽, 等. 异龙湖不同湖区浮游植物群落特征及其与环境因子的关系[J]. *环境科学*, 2019, **40**(5): 2249-2257.
Wang Z F, Zhang W, Yang L, *et al.* Characteristics of phytoplankton community and its relationship with environmental factors in different regions of Yilong Lake, Yunnan Province, China [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(5): 2249-2257.
- [43] 杨丽, 张玮, 尚光霞, 等. 淀山湖浮游植物功能群演替特征及其与环境因子的关系[J]. *环境科学*, 2018, **39**(7): 3158-3167.
Yang L, Zhang W, Shang G X, *et al.* Succession characteristics of phytoplankton functional groups and their relationships with environmental factors in Dianshan Lake, Shanghai [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(7): 3158-3167.
- [44] 代志刚, 蔺庆伟, 易科浪, 等. 杭州西湖浮游植物群落对沉水植物恢复的响应[J]. *水生态学杂志*, 2017, **38**(5): 35-45.
Dai Z G, Lin Q W, Yi K L, *et al.* Response of phytoplankton community to restoration of submerged macrophytes in West Lake, Hangzhou [J]. *Journal of Hydroecology*, 2017, **38**(5): 35-45.

CONTENTS

Influencing Factors of Long-term Variations on Gridded PM _{2.5} of Typical Regions in China Based on GAM Model	NAN Yang, ZHANG Qian-qian, ZHANG Bi-hui (499)
Gridded Atmospheric Emission Inventory of PCDD/Fs in China	CHEN Lu-lu, HUANG Tao, CHEN Kai-jie, et al. (510)
Spatio-Temporal Variations and Source Apportionment of Carbonaceous Species in PM _{2.5} Across Multiple Sampling Locations in the Chengdu Plain	SHI Fang-tian, LUO Bin, ZHANG Wei, et al. (520)
Diurnal Variations and Source Apportionment of Water-soluble Ions in PM _{2.5} During Winter in Nanjing Jiangbei New Area	QIU Chen-chen, YU Xing-na, DING Cheng, et al. (529)
Characterization, Seasonal Variation, and Source Apportionments of Particulate Amines (PM _{2.5}) in Northern Suburb of Nanjing	LI Xu-jie, SHI Xiao-wen, MA Yan, et al. (537)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of n-Alkanes and PAHs in Summertime PM _{2.5} at Background Site of Yangtze River Delta	XUE Guo-yan, WANG Ge-hui, WU Can, et al. (554)
Source Apportionment and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in PM _{2.5} in Changchun City, Autumn of 2017	ZHANG Yi-xuan, CAO Fang, ZHENG Han, et al. (564)
Heavy Pollution Characteristics and Assessment of PM _{2.5} Predicted Model Results in Beijing-Tianjin-Hebei Region and Surrounding Areas During November 23 to December 4, 2018	ZHU Yuan-yuan, GAO Yu-xiao, CHAI Wen-xuan, et al. (574)
Analysis of Characteristics and Meteorological Influence Factors of Ozone Pollution in Henan Province	QI Yan-jie, YU Shi-jie, YANG Jian, et al. (587)
Spatio-Temporal Distribution and Variation Characteristics of Aerosol Optical Properties in Henan Province	ZHANG Rui-fang, YU Xing-na (600)
Analysis of Water Soluble Organic Aerosol in Spring PM _{2.5} with Soot Particle Aerosol Mass Spectrometry (SP-AMS)	HUANG Wen-qian, CHEN Yan-tong, LI Xu-dong, et al. (609)
Temporal Evolution and Main Influencing Factors of Black Carbon Aerosol in Nanjing	YANG Xiao-min, SHI Shuang-shuang, ZHANG Chen, et al. (620)
Pollution Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient Volatile Organic Compounds(VOCs) in Summer and Autumn in Different Functional Zones of Lianyungang, China	QIAO Yue-zhen, CHEN Feng, LI Hui-peng, et al. (630)
Operation and Maintenance of Cost-Effective Volatile Organic Compounds Abatement Alternatives	QIANG Ning, SHI Tian-zhe, MIAO Hai-chao (638)
Pollution and Deposition Characteristics of Precipitation and Its Source Apportionment in Xi'an City	DING Cheng, YU Xing-na, HOU Si-yu (647)
Bacterial Diversity and Community Structure Antibiotic-resistant Bacteria in Bioaerosol of Animal Farms	SHA Yun-fei, SUN Xing-bin, XIN Wen-peng, et al. (656)
Vehicle Emission Inventory and Scenario Analysis in Liaoning from 2000 to 2030	JIN Jia-xin, SUN Shi-da, WANG Peng, et al. (665)
VOCs Emission Characteristics of DPF Regeneration in National VI Diesel Engine	QIAN Feng, XUE Chang-xin, XU Xiao-wei, et al. (674)
Characteristics and Significance of Stable Isotopes and Hydrochemistry in Surface Water and Groundwater in Nanxiaohegou Basin	GUO Ya-wen, TIAN Fu-qiang, HU Hong-chang, et al. (682)
Spatio-Temporal Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Middle and Lower Reaches of Le'an River	YU Yang, LÜ Ya-ning, WANG Wei-jie, et al. (691)
Spatio-temporal Evolution and Relationship of Water Environment Quality and Phytoplankton Community in Wenyu River	ZHU Li-ying, CHEN Yuan-yuan, LIU Jing, et al. (702)
High-Frequency Dynamics of Water Quality and Phytoplankton Community in Inflowing River Mouth of Xin'anjiang Reservoir, China	DA Wen-yi, ZHU Guang-wei, LI Yun-xiang, et al. (713)
Phosphorus Storage Capacity and Loss Risk in Coastal Reed Wetland Surrounding Bohai Sea	SONG Jia-wei, XU Gang, ZHANG Yang, et al. (728)
Spatio-Temporal Variation of Release Flux of Sediment Nitrogen and Phosphorus in High-Risk Period of Algal Bloom in Lake Erhai	LIU Si-ru, ZHAO Ji-dong, XIAO Shang-bin, et al. (734)
Fluorescence Characteristics and Source Analysis of DOM in Snowfall of Xi'an	YANG Yi, HAN Li-yuan, LIU Huan-wu, et al. (743)
Performance Assessment of Permeable Interlocking Concrete Pavement Facility Structure	ZHANG Jia-wei, LIU Yong, JIN Jian-rong, et al. (750)
Photocatalytic Degradation of Rhodamine B with Micro-SiC/Graphene Composite Under Visible Light Irradiation	ZHU Hong-qing, YANG Bing, WEI Shi-qiang, et al. (756)
Removal of BPA and EE2 from Water by Mn-Fe Embedded in Acicular Mullite	ZHOU Qiu-hong, LONG Tian-yu, HE Jing, et al. (763)
Fabrication of La-MHTC Composites for Phosphate Removal; Adsorption Behavior and Mechanism	SONG Xiao-bao, HE Shi-ying, FENG Yan-fang, et al. (773)
Adsorption of Low-Concentration Phosphorus from Water by Composite Metal Modified Biochar	SUN Ting-ting, GAO Fei, LIN Li, et al. (784)
Phosphate Adsorption from Water on CaO ₂ -loaded Magnetic Diatomite	XU Chu-tian, LI Da-peng, ZHANG Shuai, et al. (792)
Phosphorus Forms and Release Risk of Sediments in Urban Sewage Treatment Plant Effluent and Receiving Stream Reach	TANG Ning, LI Ru-zhong, WANG Yu-qing, et al. (801)
Purification Characteristics of Urban Tail Water from Sewage Treatment Plant by Biofilm Ecological Floating Bed	ZHAO Zhi-rui, ZHANG Jia-yao, LI Duo, et al. (809)
Removal Performance of Antibiotic Resistance Genes and Heavy Metal Resistance Genes in Municipal Wastewater by Magnetic-Coagulation Process	YU Wen-chao, ZHENG Li-bing, WEI Yuan-song, et al. (815)
Effect of Tetracycline Antibiotic on Abundance and Transcriptional Expression Level of Tetracycline Resistance Genes in Activated Sludge	RUAN Xiao-hui, QIAN Ya-jie, XUE Gang, et al. (823)
Denitrification Process and N ₂ O Production Characteristics of Heterotrophic Nitrifying Bacterium <i>Pseudomonas aeruginosa</i> YL	YANG Lei, CUI Shen, REN Yong-xiang, et al. (831)
Environmental Factors Influence and Microbial Community Structure Analysis of Entrapped Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria	WANG Xiao-tong, YANG Hong, SU Yang, et al. (839)
Research on Denitrification Performance of Enhanced Secondary Effluent by Embedded Denitrification Filler and Pilot Application	ZHOU Ya-kun, YANG Hong, WANG Shao-lun, et al. (849)
Temporal Anaerobic Effect on Aerobic Granular Sludge with Intermittent Influent-Intermittent Aeration	ZHANG Jie, WANG Yu-ying, LI Dong, et al. (856)
Simultaneous Short-Cut Nitrification-Denitrification Phosphorus Removal Granules Induced by Phosphorus Removal Granules	LI Dong, LIU Bo, WANG Wen-qi, et al. (867)
Spatial Distribution Characteristics and Pollution Assessment of Heavy Metals on Farmland of Geochemical Anomaly Area in Southwest Guangxi	WANG Fo-peng, XIAO Nai-chuan, ZHOU Lang, et al. (876)
Evaluation and Source of Heavy Metal Pollution in Surface Soil of Qinghai-Tibet Plateau	YANG An, WANG Yi-han, HU Jian, et al. (886)
Characteristics and Factors of Soil Enzyme Activity for Different Plant Communities in Yellow River Delta	MO Xue, CHEN Fei-jie, YOU Chong, et al. (895)
Effects of Management Measures on Soil Water-soluble Carbon and Nitrogen and Their Three-Dimensional Fluorescence Characteristics of <i>Pinus tabulaeformis</i> Plantations on Loess Plateau	SONG Ya-hui, ZHANG Jiao-xiang, LIU Hong-fei, et al. (905)
Effects of Biochar Input on Changes of Available Nutrient Elements in Riparian Soils with Different Landuse Types	ZHOU Hui-hua, YUAN Xu-yin, XIONG Yu-ting, et al. (914)
Effect of Applying Hydrochar for Reduction of Ammonia Volatilization and Mechanisms in Paddy Soil	YU Shan, XUE Li-hong, HUA Yun, et al. (922)
Effects of Mycorrhizal Fungi on Nitrification and Denitrification in the Rhizospheric Soil of Aquatic Plants and Its Microbial Mechanism	LIU Duo, WANG Lei, CAO Zhan-bo, et al. (932)
Comparison of Floating Chamber and Diffusion Model Methods for Measuring Methane Emissions from Inland Fish-Aquaculture Ponds	HU Tao, HUANG Jian, DING Ying, et al. (941)
Simultaneous Quantitative Detection of Thirteen Common Antibiotics in Leafy Vegetables by Ultra-High Performance Liquid Chromatography-Tandem Mass Spectrometry	CHEN Qian, LIU Yang, XIAO Li-jun, et al. (952)
Accumulation and Translocation of Cd in <i>Brassica rapa</i> Under the Influence of Selenium	YU Yao, LUO Li-yun, LIU Zhe, et al. (962)
Tolerance Mechanism and Cadmium Enrichment Abilities in Two <i>Brassica napus</i> L. Cultivars	BIAN Jian-lin, GUO Jun-mei, WANG Xue-dong, et al. (970)
Enhanced Phytoextraction of Cadmium Contaminated Soil by <i>Trifolium Repens</i> with Biodegradable Chelate GLDA	HE Yu-long, YU Jiang, XIE Shi-qian, et al. (979)
Heavy Metal Contents in Animal Manure in China and the Related Soil Accumulation Risks	MU Hong-yu, ZHUANG Zhong, LI Yan-ming, et al. (986)
Microbial Community Succession in Industrial Composting with Livestock Manure and Peach Branches and Relations with Environmental Factors	CAI Han-bing, FENG Wen-wen, DONG Yong-hua, et al. (997)
Degradation Characteristics of Antibiotics During Composting of Four Types of Feces	ZHU Wei-jing, ZHU Feng-xiang, WANG Wei-ping, et al. (1005)