

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

2000~2018年我国大气重金属沉降通量时空变化特征

陈其永, 郜允兵, 倪润祥, 潘瑜春, 阎跃观, 杨晶, 刘孝阳, 顾晓鹤



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年9月

第43卷 第9期

Vol.43 No.9

目次

2000~2018年我国大气重金属沉降通量时空变化特征 ..... 陈其永, 郇允兵, 倪润祥, 潘瑜春, 阎跃观, 杨晶, 刘孝阳, 顾晓鹤(4413)

面向二/三维城市形态指标的PM<sub>2.5</sub>浓度调控模拟 ..... 李莎, 邹滨, 刘宁, 冯徽徽, 陈军, 张鸿辉(4425)

减排背景下成都大气PM<sub>2.5</sub>碳质组分特征 ..... 陈璐瑶, 于阳春, 黄小娟, 董贵明, 张军科(4438)

青岛秋冬季PM<sub>1</sub>中金属元素污染特征及健康风险评估 ..... 刘子杨, 张宜升, 张厚勇, 马子轸, 陶文鑫, 王娇, 薛莲, 彭倩倩, 杜金花, 赵娇娇, 彭亮, 孙英杰(4448)

港口地区大气PM<sub>2.5</sub>中多环芳烃污染特征及来源分析 ..... 王鹏程, 杨凌霄, 别淑君, 黄琦, 齐安安, 虞雄, 王滢铭, 徐鹏, 张天琪, 王文兴(4458)

天津市冬季道路颗粒物粒径分布及来源解析 ..... 张国涛, 殷宝辉, 白雯宇, 郭丽瑶, 王智宇, 张楠, 郑镇森, 张利文, 杨文, 韩斌, 白志鹏(4467)

北京市生物源一次气溶胶浓度变化特征及影响因素 ..... 梁林林, 刘畅, 刘旭艳, 徐婉筠, 张根, 程红兵, 刘雨思(4475)

北京市城区夏季VOCs变化特征分析与来源解析 ..... 孟祥来, 孙扬, 廖婷婷, 张琛, 张成影(4484)

东莞工业集中区夏季臭氧污染与非污染期间VOCs组分特征及其来源 ..... 周振, 肖林海, 费蕾蕾, 余纬, 林满, 黄筠钧, 张智胜, 陶俊(4497)

生活垃圾填埋场恶臭污染的时空变化与膜阻隔效果 ..... 何晶晶, 李健晨, 吕凡, 章骅, 邵立明(4506)

不同年份太湖水域全氟化合物健康风险源解析对比 ..... 武婷, 孙善伟, 樊境朴, 鲁富蕾, 郭昌胜, 徐建(4513)

沱江流域典型及新兴全氟/多氟化合物的污染特征及来源解析 ..... 宋娇娇, 汪艺梅, 孙静, 方淑红(4522)

白洋淀不同类型水体表层沉积物重金属的赋存形态及风险 ..... 许梦雅, 张超, 单保庆, 刘操(4532)

喹诺酮类抗生素在城市典型水环境中的分配系数及其主要环境影响因子 ..... 剧泽佳, 付雨, 赵鑫宇, 陈慧, 宋圆梦, 赵波, 张纪媛, 卢梦洪, 崔建升, 张璐璐(4543)

石家庄地下水中喹诺酮类抗生素生态风险及其与环境因子的相关性 ..... 陈慧, 剧泽佳, 赵鑫宇, 付雨, 崔建升, 张璐璐(4556)

不同淹水环境下湖泊沉积物DOM的特征与来源 ..... 陈佳, 李忠武, 金昌盛, 文佳骏, 聂小东, 王磊(4566)

晋城市沁河流域秋季浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系 ..... 高梦蝶, 李艳粉, 李艳利, 孙昂, 田爽, 张春晖, 耿亚平, 李林霞(4576)

不同配置绿色屋顶径流水质特征及综合评价 ..... 章孙逊, 张守红, 闫婧, 王任重远, 杨航(4587)

紫外活化过硫酸盐降解磷酸氯喹 ..... 李阳, 许玻琀, 邓琳, 罗伟(4597)

微气泡臭氧氧化预处理实际制药废水去除SS和有有机性能 ..... 刘春, 陈蕊, 张静, 杨旭, 陈晓轩, 郭延凯, 武明泽, 庞勃(4608)

废水排放对近海环境中抗生素抗性基因和微生物群落的影响 ..... 陈嘉瑜, 苏志国, 姚鹏城, 黄备, 张永明, 温东辉(4616)

生物炭和秸秆还田对微咸水滴灌棉田土壤真菌群落结构多样性的影响 ..... 郭晓雯, 陈静, 鲁晓宇, 李远, 陶一凡, 闵伟(4625)

有机物料投入对喀斯特地区土壤磷素赋存形态与含 $phoD$ 基因细菌群落的影响 ..... 夏鑫, 乔航, 孙琪, 刘坤平, 陈香碧, 何寻阳, 胡亚军, 苏以荣(4636)

煤矿矿区复垦植被类型对土壤微生物功能基因和酶活的影响 ..... 宁岳伟, 刘勇, 张红, 李君剑(4647)

生物炭施用对黄壤土壤养分及酶活性的影响 ..... 袁访, 李开钰, 杨慧, 邓承佳, 梁红, 宋理洪(4655)

黄河源区斑块化退化高寒草甸土壤细菌群落多样性变化 ..... 孙华方, 李希来, 金立群, 赵玉蓉, 李成一, 张静, 宋梓涵, 苏晓雪, 刘凯(4662)

模拟氮沉降对三江平原小叶章湿地土壤微生物碳源利用能力的影响 ..... 翁晓虹, 隋心, 李梦莎, 刘赢男, 张荣涛, 杨立宾(4674)

石家庄市土壤中喹诺酮类抗生素空间分布特征及其与微生物群落相关性 ..... 赵鑫宇, 剧泽佳, 陈慧, 付雨, 宋圆梦, 赵波, 张纪媛, 卢梦洪, 崔建升, 张璐璐(4684)

典型氧化还原环境中微塑料表面的微生物群落组成特征与构建机制 ..... 龚志伟, 马杰, 苏趋, 林亚楠, 董鑫磊, 周立昌, 王宗平, 郭刚(4697)

作物秸秆材料处理养殖废水中氮的周年去除效果及其对氮循环微生物丰度的影响 ..... 刘铭羽, 夏梦华, 蒋磊, 彭健, 陈坤, 赵聪芳, 李希, 孟岑, 曾睿, 王栋, 李裕元, 吴金水(4706)

不同外碳源对尾水极限脱氮性能及微生物群落结构的影响 ..... 王伟, 赵中原, 张鑫, 由志鹏, 黄子晋, 彭永臻(4717)

总氮提标改造工程的微生物群落结构分析 ..... 李海松, 王柯丹, 陈晓蕾, 阎登科, 许子聪, 胡培杰(4727)

IFAS工艺处理南方低碳源污水的泥膜微生物互作规律分析 ..... 赫俊国, 江伟勋, 何卓义, 刘新平, 吴世华, 储昭瑞, 冯杰(4736)

黄土高原土地利用方式对微塑料丰度和形态分布的影响 ..... 郝永丽, 胡亚鲜, 白晓雄, 郭胜利(4748)

南方丘陵区土壤重金属含量、来源及潜在生态风险评价 ..... 王玉, 辛存林, 于爽, 薛红蕾, 曾鹏, 孙平安, 刘凡(4756)

兰州市耕地“五毒”重金属的风险评价与归因分析 ..... 张利瑞, 彭鑫波, 马延龙, 康乐, 张妍娥, 王泉灵, 张松林(4767)

石家庄市栾城区农田土壤重金属分布特征及作物风险评价 ..... 孟晓飞, 郭俊梅, 杨俊兴, 郑国砥, 陈同斌, 刘杰(4779)

典型城市土壤中重金属锑(Sb)的含量分布特征及风险评价 ..... 沈城, 叶文娟, 钱诗颖, 吴健, 朱旭东, 王敏(4791)

有色金属矿业城市典型村镇土壤重金属污染评价及来源解析 ..... 汪峰, 黄言欢, 李如忠, 吴鸿飞(4800)

柠檬酸及刈割强化象草修复镉污染土壤的效应 ..... 唐棋, 伍港繁, 辜娇峰, 周航, 曾鹏, 廖柏寒(4810)

稻田落干过程甲基化效率变化与关键影响因素分析 ..... 张玥, 李令仪, 文炯, 曾希柏, 苏世鸣(4820)

外源茉莉酸对水稻幼苗根系伸积及抗逆应答效应 ..... 李颜, 黄益宗, 保琼莉, 黄永春, 张盛楠(4831)

秸秆还田配施化肥对土壤养分及冬小麦产量的影响 ..... 宋佳杰, 徐郗阳, 白金泽, 于琦, 程伯豪, 冯永忠, 任广鑫(4839)

冬季绿肥对黄土高原旱作春玉米农田土壤温室气体排放的影响 ..... 张少宏, 王俊, 方震文, 付鑫(4848)

庞泉沟自然保护区土壤呼吸空间分异性影响因素探测 ..... 李晓敏, 严俊霞, 杜自强, 王琰(4858)

小型养殖塘水体中CH<sub>4</sub>、CO<sub>2</sub>和N<sub>2</sub>O浓度的时空变化特征及影响因素 ..... 石婕, 张弥, 邱吉丽, 万梓文, 赵若男, 谢燕红, 陈明健, 赵佳玉, 肖薇, 刘寿东(4867)

丁基黄药对选矿区土壤吸附铅镉的影响 ..... 胡志浩, 郭朝晖, 冉洪珍, 肖细元, 彭驰, 李钰滢(4878)

秸秆生物炭吸附对乙酰氨基酚的机制及其位能分布特征 ..... 商岑尧, 顾若婷, 张强, 谢慧芳, 王冰玉(4888)

黄土高原地区生态脆弱性时空变化及其驱动因子分析 ..... 张良侠, 樊江文, 张海燕, 周德成(4902)

植物促生菌在重金属生物修复中的作用机制及应用 ..... 马莹, 王玥, 石孝均, 陈新平, 李振轮(4911)

《环境科学》征订启事(4512) 《环境科学》征稿简则(4735) 信息(4696, 4790, 4887)

# 晋城市沁河流域秋季浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系

高梦蝶<sup>1</sup>, 李艳粉<sup>2</sup>, 李艳利<sup>1\*</sup>, 孙昂<sup>1</sup>, 田爽<sup>3</sup>, 张春晖<sup>1</sup>, 耿亚平<sup>1</sup>, 李林霞<sup>1</sup>

(1. 河南理工大学资源环境学院, 焦作 454000; 2. 焦作大学化工与环境工程学院, 焦作 454000; 3. 大连海洋大学水产与生命学院辽宁省水生生物学重点实验室, 大连 116023)

**摘要:** 为了摸清晋城沁河流域浮游植物的空间分布及关键驱动因子, 于2020年10~11月对山西省晋城市沁河和丹河的62个采样点的浮游植物及环境因子进行调查分析. 鉴定出浮游植物7门47种, 由隐藻门、绿藻门、甲藻门、金藻门、硅藻门、蓝藻门和裸藻门组成. 沁河的优势种为小球藻、嗜蚀隐藻、尖尾蓝隐藻、具星小环藻、绿球藻和绿色裸藻. 丹河的优势种为嗜蚀隐藻、史密斯胸隔藻、绿色裸藻、具星小环藻、小球藻和矩圆囊裸藻. Shannon-Wiener多样性指数( $H'$ )的范围为0.35~3.15, 均值为1.40, Pielou均匀度( $J$ )的范围为0.24~1.00, 均值为0.68. 丹河浮游植物多样性指数高于沁河, 沁河晋城段中游和丹河晋城段中下游浮游植物均匀度指数最低. 典范对应分析结果表明: 河岸缓冲区林地面积比例是影响沁河绿藻门绿球藻分布的主要驱动因子, 绿色裸藻的分布主要受硝态氮、总磷和河岸林地面积比例的影响, 具星小环藻的分布主要受城镇建设用地的面积比例和温度的影响, 小球藻、嗜蚀隐藻和尖尾蓝隐藻主要分布受农村聚落用地和耕地面积比例的影响. 丹河嗜蚀隐藻和具星小环藻的分布主要受pH和硫酸盐影响, 绿色裸藻主要受河岸城镇建设和草地面积影响, 矩圆囊裸藻主要受林地面积比例和 $Cl^-$ 影响最大, 史密斯胸隔藻的分布主要受水温和耕地面积比例影响最大, 小球藻主要受氨氮和耕地面积影响最大.

**关键词:** 浮游植物; 优势种; 环境因子; 河岸缓冲区土地利用; 典范对应分析(CCA)

中图分类号: X171.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)09-4576-11 DOI: 10.13227/j.hjkk.202111307

## Characteristics of Phytoplankton Community Structure and Their Relationships with Environmental Factors in Autumn in Qinhe River Basin of Jincheng Region

GAO Meng-die<sup>1</sup>, LI Yan-fen<sup>2</sup>, LI Yan-li<sup>1\*</sup>, SUN Ang<sup>1</sup>, TIAN Shuang<sup>3</sup>, ZHANG Chun-hui<sup>1</sup>, GENG Ya-ping<sup>1</sup>, LI Lin-xia<sup>1</sup>

(1. School of Resources and Environment, Henan University of Technology, Jiaozuo 454000, China; 2. School of Chemical and Environmental Engineering, Jiaozuo University, Jiaozuo 454000, China; 3. Liaoning Key Laboratory of Aquatic Biology, School of Fisheries and Life, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China)

**Abstract:** In October–November 2020, the phytoplankton and the aquatic environment from 62 sites in the mainstream of the Qinhe River and the largest tributary of the Qinhe River (Danhe River) in the Jincheng region were investigated to clarify the spatial pattern of phytoplankton communities and their driving factors. A total of 7 phyla and 47 species of phytoplankton were identified in the Qinhe River basin and were composed of Cryptophyta, Chlorophyta, Pyrrophyta, Chrysophyta, Bacillariophyta, Cyanophyta, and Crytophyta. Six dominant species in the Qinhe River included: *Chlorella vulgaris*, *Cryptomonas erosa*, *Chroomonas acuta*, *Cyclotella stelligera*, *Chlorococcum*, and *Euglena viridis*. Six dominant species in the Danhe River included: *C. erosa*, *Frustulia vulgaris*, *E. viridis*, *C. vulgaris*, *Trachelomonas oblonga* Lemm, and *C. stelligera*. The Shannon-Wiener diversity index ( $H'$ ) varied from 0.35 to 3.15, with a mean value 1.40. The Pielou evenness index ( $J$ ) varied from 0.24 to 1.00, with a mean value of 0.68.  $H'$  values in the Qinhe River were higher than those in the Danhe River.  $J$  values were relatively low in the middle reaches of the Qinhe River and middle-low reaches of the Danhe River. The results in the Qinhe River through a canonical correspondence analysis (CCA) showed that the percent of forest land at a 300 m buffer was the driving factor of *Chlorococcum* in Chlorophyta, and nitrate, total phosphorus, and the percent of forest land at the 300 m buffer were the driving factors of *E. viridis*. *Cyclotella stelligera* was mainly influenced by the percent of urban land and water temperature, whereas *C. vulgaris*, *C. erosa*, and *C. acuta* were mainly influenced by the percent of farmland and residential land at the 300 m buffer. The results in the Danhe River via CCA showed that *C. erosa* and *C. stelligera* were mainly influenced by pH and sulfate, *E. viridis* was mainly influenced by the percent of urban land and grass land, *T. oblonga* Lemm was mainly influenced by chloride and the percent of forest land, *F. vulgaris* was mainly influenced by water temperature and the percent of farmland, and *C. vulgaris* was mainly influenced by ammonia and the percent of farmland.

**Key words:** phytoplankton; dominant species; environmental factors; land use in riparian buffer zone; canonical correspondence analysis(CCA)

沁河作为晋城市境内最大的河流,其河流生态系统状况对社会经济发展至关重要<sup>[1]</sup>. 随着晋城近年来快速的城市化进程,人类对沁河流域的干扰如工业、农业及水资源过度开发等日趋严重,使沁河的自然生态环境逐渐恶化. 近年沁河水生态系统的监测主要集中在水质指标如化学需氧量(COD)、氨氮( $NH_4^+-N$ )和总磷(TP). 但河流水环境管理的目标并非是水环境污染物的,基于水生态系统安全的管理强调的是从生态系统健康的角度进

行管理<sup>[2]</sup>. 因此,从水生态的角度监测和评价水环境质量状况对于沁河生态系统的保障和可持续发展至关重要.

浮游植物是水环境中重要的生物类群之一,在

收稿日期: 2021-11-30; 修订日期: 2021-12-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(41401029, U1704241, 13A610319); 河南省高等学校重点科研项目(19A70006)

作者简介: 高梦蝶(1998~),女,硕士研究生,主要研究方向为河流水生态, E-mail: 2658836732@qq.com

\* 通信作者, E-mail: liyanli@hpu.edu.cn

水生生态系统初级生产力中占据很大比例,其在能量流、营养物循环和食物网的动态平衡方面发挥着关键作用<sup>[3,4]</sup>. 营养物质的过剩会引起浮游植物的过度生长<sup>[5~7]</sup>,由此引起的大暴发严重威胁水生生态系统的结构和功能如水质恶化并威胁饮用水安全<sup>[8]</sup>,浮游植物对环境变化反应非常敏感,是常用于监测水环境质量变化的重要指示物种<sup>[9~14]</sup>. 浮游植物对水环境质量的变化如营养物质、光照、温度、透明度和水体污染是敏感的<sup>[15~19]</sup>.

因此,本文于2020年对山西省晋城市沁河流域浮游植物进行实地调查采样,主要聚焦在浮游植物的种类、密度、生物量和生物多样性指数等表征沁河浮游植物群落结构特征的指标的分析. 本研究以河岸缓冲区300 m土地利用格局以及水环境理化因子为环境变量,探讨影响山西省晋城市沁河流域浮游植物群落结构分布的主要驱动因子,以期为晋城市沁河流域的水环境质量评价和水资源合理利用与保护提供参考.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域

本文研究区域是山西省晋城市内的沁河流域,位于东经112°00′~113°25′,北纬35°16′~35°58′. 晋城市全境位于丹河和沁河中下游流域晋

城盆地之中,沁河是黄河的一级支流,发源于沁源县霍山南麓的二郎神沟,自北向南流经沁源县和安泽县,经过晋城市沁水、泽州和阳城等县市后,最终于河南省武陟县汇入黄河. 沁河干流总长485 km,晋城市境内河长168 km. 沁河流域面积1.35万 km<sup>2</sup>,晋城境内7 803 km<sup>2</sup><sup>[20]</sup>. 丹河是沁河流域的一级支流,同时也是晋城市区域内第二大地表河流. 丹河发源于高平市北部丹株岭的琉璃山,流域面积为3 152 km<sup>2</sup>,晋城市境内流域面积2 945 km<sup>2</sup>,长度129 km<sup>[1]</sup>.

沁河流域属大陆性气候,四季分明,年平均气温10~14℃,气温南高北低,下游气温偏高<sup>[1]</sup>. 年降水量自南而北递减,上中游平均降雨量为617 mm,下游600~720 mm. 沁河流域地形北高南低,上游以石质山区为主,中部多为土石丘陵区,河谷两岸土地肥沃,是主要农业区.

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 样点设置

2020年10~11月,在晋城市沁河流域共设置了62个采样点位进行浮游植物采集(见图1). 其中沁河设置了34个点位(1~34),包括沁水县(1~20)、阳城县(21~28)和泽州县(29~34);丹河共设置28个点位(35~62),包括高平市(35~48)和泽州县(49~62).

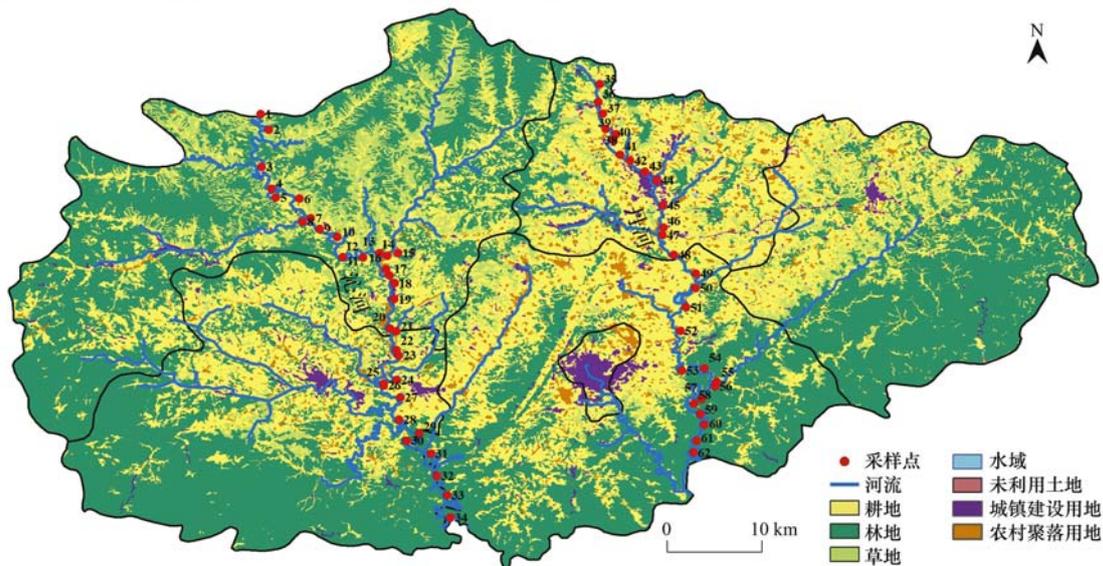


图1 晋城市沁河流域采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling sites in Qinhe River basin of Jincheng region

#### 1.2.2 浮游植物采集及分类鉴定方法

浮游植物样本的采集用采水器在各水层中取混合水样2 L,置于同一容器混合,充分摇匀后取10~15 mL鲁哥氏液进行固定. 藻类定量样品按常规方法静置48 h以上,虹吸去除上清液,浓缩至50 mL,

收集藻类细胞. 混匀沉淀样品,用浮游植物计数框在光学显微镜下进行观察计数<sup>[21]</sup>.

#### 1.2.3 水环境因子数据的获取

2020年10~11月对山西晋城沁河流域的水体理化参数进行了调查和测定. 水温(WT)、溶解氧

(DO)和 pH 使用便携式水质分析仪于现场进行了测定. 在每个采样点采集 2 个 2 L 的平行水样, 置于低温保温箱中, 于 48 h 内带回实验室, 参照文献 [22] 的方法测定以下水化学指标: 氯化物 ( $\text{Cl}^-$ )、氟化物 ( $\text{F}^-$ )、总氮 (TN)、总磷 (TP)、氨氮 ( $\text{NH}_4^+-\text{N}$ )、硫酸盐 ( $\text{SO}_4^{2-}$ )、硝酸盐氮 ( $\text{NO}_3^--\text{N}$ ) 和化学需氧量 (COD).

#### 1.2.4 河岸缓冲区土地利用数据

首先, 沁河流域水系的提取: 于“地理空间数据云”网站上下载沁河流域 90 m DEM 栅格数据, 利用 ArcGIS 中“水文分析”工具进行河网的提取, 得到沁河流域水系. 其次, 300 m 河岸缓冲区边界的提取: 利用 ArcGIS 中“编辑工具条”-“打断”工具将河流从各采样点处打断; 利用“编辑工具条”-“切割”工具以采样点为起点在采样点上游处进行河流的切割, 切割距离设置为 1 km; 利用“缓冲区”工具进行缓冲区划分, 选择“普通缓冲区”, 以切割后的 1 km 河流为中心, 给定缓冲距离为 300 m, 得到以 1 km 河流为中心的 300 m 河岸缓冲区边界. 最后, 300 m 河岸缓冲区土地利用数据的获取: 于“国家科学工程-地球系统科学共享网”下载分辨率为 30 m  $\times$  30 m 的 2018 年晋城市土地利用栅格数据, 利用 ArcGIS 中“数据管理”-“栅格”-“栅格数据处理”-“裁剪”工具, 输入裁剪对象为土地利用栅格数据, 裁剪范围为各采样点 300 m 河岸缓冲区矢量数据, 得到各采样点 300 m 河岸缓冲区土地利用数据.

#### 1.2.5 数据分析

Shannon-Wiener 多样性指数 ( $H'$ ) 能够反映出群落结构的复杂程度, 指数越大, 表明群落结构越复杂和稳定. Pielou 均匀度指数 ( $J$ ) 指一个群落或生境中全部物种个体数目的分配状况, 能够反映出各物种个体数目分配的均匀程度, 指数越大, 则群落越稳定, 多样性越高.

采用 Excel 2010 计算 Mcnaughton 优势度 ( $Y$ )、Shannon-Wiener 多样性指数 ( $H'$ ) 和 Pielou 均匀度指

数 ( $J$ ). 计算公式分别为:

$$Y = (n_i/N) \times f_i \quad (1)$$

$$H' = - \sum_{i=1}^S P_i \log_2 P_i \quad (2)$$

$$J = H'/\log_2 S \quad (3)$$

式中,  $f_i$  为物种  $i$  出现的频率,  $n_i$  为物种  $i$  的个体数;  $N$  为全部样品的总个体数;  $S$  为样品中浮游植物物种总数.  $P_i$  为第  $i$  种生物的个体数与总体数的比值. 取优势度  $Y \geq 0.015$  的物种作为优势种.

本文通过 Origin 和 Excel 软件对数据进行统计、作图和分析; 使用 ArcGIS 软件对晋城市沁河流域采样点位分布及各采样点上游 1 km 内宽度为 300 m 缓冲区进行绘制. 采用 Canoco5.0 软件对浮游植物优势种类进行去趋势对应分析 (detrended correspondence analysis, DCA), 发现沁河和丹河浮游植物优势种的梯度值分别为 3.94 和 3.78, 故选择典范对应分析 (canonical correspondence analysis, CCA) 影响山西晋城沁河流域浮游植物群落和主要水环境因子和土地利用的关系. 为消除极值影响, 在进行统计分析之前对数据进行  $\lg(x+1)$  转换, 使数据满足正态分布<sup>[23, 24]</sup>.

## 2 结果与分析

### 2.1 浮游植物群落结构特征

#### 2.1.1 物种组成及优势类群

本次沁河流域晋城段调查共鉴定出 7 门 47 种 (属), 其中以硅藻门与绿藻门为主, 分别为 22 种和 12 种, 分别占物种数的 46.8% 和 25.5% (表 1). 其次为蓝藻门, 鉴定出 5 种, 占物种数的 10.6%. 沁河鉴定出浮游植物 6 门 29 种, 其中以硅藻门和绿藻门为主, 分别为 12 种和 10 种, 分别占物种数的 41.4% 和 34.5%. 其次为隐藻门, 鉴定出物种数 3 种, 占比为 10.3%. 丹河鉴定出浮游植物 6 门 36 种, 其中以硅藻门为主, 占比 52.8%, 其次为绿藻门和蓝藻门, 均鉴定出 5 种, 占物种总数的 13.9%. 沁

表 1 沁河和丹河秋季浮游植物物种组成

Table 1 Species composition of phytoplankton in Qinhe River and Danhe River in autumn

门	沁河	丹河	总和
蓝藻门 Cyanophyta	1 种(3.5%)	5 种(13.9%)	5 种(10.6%)
隐藻门 Cryptophyta	3 种(10.3%)	3 种(8.3%)	3 种(6.4%)
硅藻门 Euglenophyta	12 种(41.4%)	19 种(52.8%)	22 种(46.8%)
绿藻门 Chlorophyta	10 种(34.5%)	5 种(13.9%)	12 种(25.5%)
裸藻门 Euglenophyta	2 种(6.9%)	3 种(8.3%)	3 种(6.4%)
金藻门 Chrysophyta	1 种(3.5%)	—	1 种(2.1%)
甲藻门 Pyrrophyta	—	1 种(2.8%)	1 种(2.1%)
合计	6 门 29 种	6 门 36 种	7 门 47 种

1) 括号内的数值表示沁河和丹河秋季浮游植物各门物种数占每条河浮游植物总物种数的比例

河绿藻门与硅藻门类群物种数处于优势地位, 丹河硅藻门类群物种数处于优势地位, 表明沁河浮游植物种类组成为绿藻-硅藻型, 丹河浮游植物种类组成为硅藻型。

根据公式(1)及优势度  $Y \geq 0.015$  的标准, 计算出沁河和丹河浮游植物优势种及优势度值(表 2)。结果显示, 沁河表现出多个优势种的群落结构, 优势种共有 4 门 6 种, 优势度值变化为 0.016 ~ 0.617。其中以绿藻门的小球藻优势度最高, 其次为隐藻门的嗜蚀隐藻和尖尾蓝隐藻、硅藻门的具星小环藻和裸藻门的绿色裸藻。丹河也表现出多个优势种的群落结构, 优势度值变化为 0.022 ~ 0.149。其中以硅藻门的具星小环藻优势度较高, 隐藻门的嗜蚀隐藻为第二优势种, 其余的优势种还包括硅藻门的史密斯胸隔藻、绿藻门的小球藻和裸藻门的绿色裸藻和矩圆囊裸藻。

表 2 沁河和丹河浮游植物优势种和优势度  
Table 2 Dominant species and their dominance  
of phytoplankton in Qinhe River and Danhe River

优势种	优势度	
	沁河	丹河
史密斯胸隔藻 ( <i>Frustulia vulgaris</i> )	—	0.037
嗜蚀隐藻 ( <i>Cryptomonas erosa</i> )	0.026	0.094
尖尾蓝隐藻 ( <i>Chroomonas acuta</i> )	0.026	—
具星小环藻 ( <i>Cyclotella stelligera</i> )	0.022	0.149
小球藻 ( <i>Chlorella vulgaris</i> )	0.617	0.022
绿球藻 ( <i>Chlorococcum</i> )	0.016	—
矩圆囊裸藻 ( <i>Trachelomonas oblonga</i> Lemm)	—	0.022
绿色裸藻 ( <i>Euglena viridis</i> )	0.017	0.026

### 2.1.2 密度与生物量

晋城市沁河流域各采样点中, 硅藻门物种的密

度最大 ( $5.35 \times 10^7 \text{ ind} \cdot \text{L}^{-1}$ ), 占比达 40.93%, 其次是裸藻门 ( $2.79 \times 10^7 \text{ ind} \cdot \text{L}^{-1}$ )、隐藻门 ( $2.27 \times 10^7 \text{ ind} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 和绿藻门 ( $1.76 \times 10^7 \text{ ind} \cdot \text{L}^{-1}$ ), 占比分别为 21.38%、17.41% 和 13.48%。而蓝藻门 ( $8.63 \times 10^6 \text{ ind} \cdot \text{L}^{-1}$ )、甲藻门 ( $2.11 \times 10^5 \text{ ind} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 和金藻门 ( $2.63 \times 10^4 \text{ ind} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 的密度相对较小, 占比分别为 6.61%、0.16% 和 0.02%。沁河浮游植物的总密度为  $1.39 \times 10^7 \text{ ind} \cdot \text{L}^{-1}$ , 丹河浮游植物的总密度为  $1.17 \times 10^8 \text{ ind} \cdot \text{L}^{-1}$ , 丹河浮游植物的密度约是沁河浮游植物的密度的 8 倍(图 2)。

本次调查裸藻门的生物量最大 ( $418.88 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ), 占比为 68.02%。其次是硅藻门 ( $142.34 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ), 占比为 23.11%, 隐藻门 ( $43.58 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 占比 21.09%。蓝藻门、绿藻门、甲藻门和金藻门的生物量相对较小, 分别为 7.07、3.12、0.84 和 0.01  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 占比分别为 1.15%、0.51%、0.14% 和 0.002%。沁河密度占据绝对优势的是绿藻门, 但是生物量较大的是裸藻门、硅藻门和隐藻门。丹河中密度占绝对优势的是硅藻门, 生物量最大的是裸藻门, 其次是硅藻门。沁河浮游植物生物量为  $11.17 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 丹河浮游植物生物量为  $601.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 丹河浮游植物的生物量约是沁河浮游植物的生物量的 54 倍(图 2)。

### 2.1.3 多样性指数与均匀度指数

生物多样性是群落的主要特征之一, Shannon-Wiener 多样性指数 ( $H'$ ) 多用于反映群落结构的复杂程度, 数值越大, 群落结构越复杂, 对环境的反馈功能越强, 越稳定。各采样点浮游植物  $H'$  的范围为 0.35 ~ 3.15, 均值为 1.40(图 3)。  $H'$  波动幅度较大, 平均值较

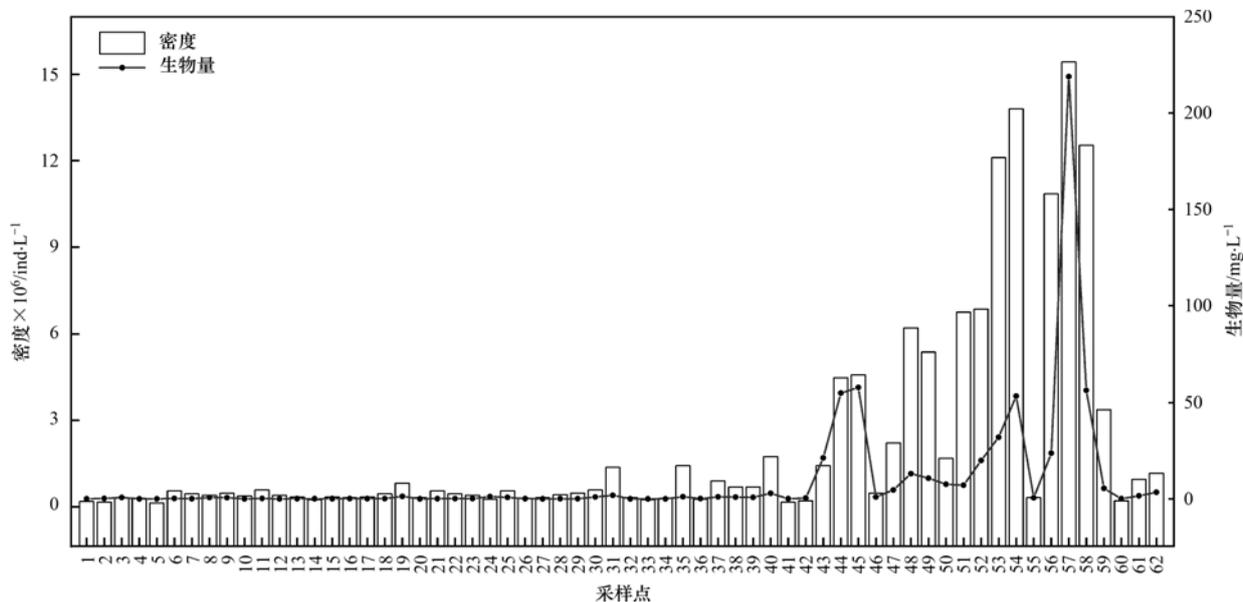


图 2 沁河晋城段浮游植物密度与生物量

Fig. 2 Phytoplankton density and biomass in Qinhe River of Jincheng region

低. 整体看, 沁河的最大支流丹河浮游植物多样性高于沁河干流, 可能因为丹河大多数点位都发现了具星小环藻、尖针杆藻、卡里舟形藻和史密斯胸隔藻等物种, 而绿藻门的小球藻在沁河占绝对优势.

Pielou 均匀度指数 ( $J$ ) 反映一个群落或生境中全部物种个体数目分配的均匀程度, 均匀度值越大,

则物种多样性越高.  $J$  的范围是 0.24 ~ 1.00, 均值是 0.68 (图 3). 整体看, 沁河中游浮游植物均匀度指数较低, 沁河干流中游点位 (点位 10 ~ 28) 的物种是绿藻门的小球藻和隐藻门的嗜蚀隐藻和尖尾蓝隐藻. 丹河中游点位 (点位 43 ~ 45 和 55 ~ 58) 浮游植物均匀度指数也较低.

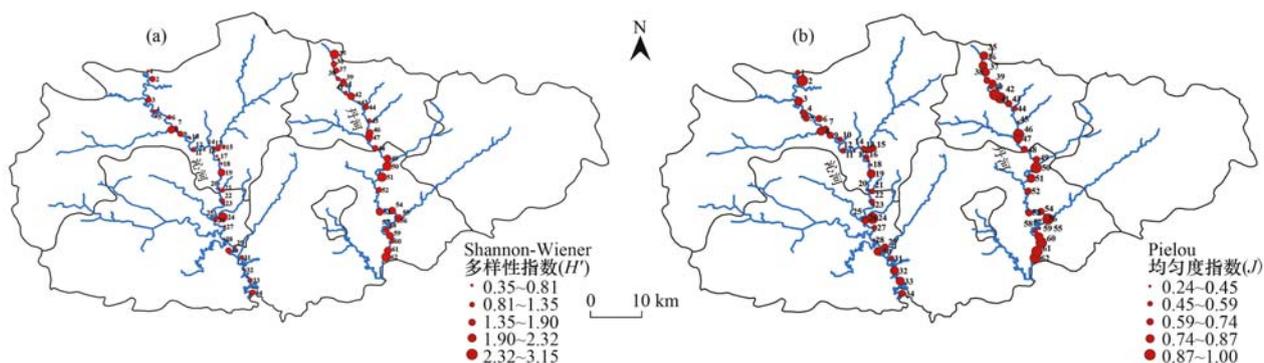


图 3 沁河晋城段浮游植物 Shannon-Wiener 多样性指数 ( $H'$ ) 和 Pielou 均匀度指数 ( $J$ ) 的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of Shannon-Wiener diversity index ( $H'$ ) and evenness index ( $J$ ) of phytoplankton in Qinhe River in Jincheng region

## 2.2 环境因子

### 2.2.1 水环境因子

沁河晋城段  $\rho$  (TN) 的范围为 0.55 ~ 21.73  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 均值为 4.87  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  [图 4(a)], 沁河中下

游和丹河中游点位 TN 浓度最高, 属于劣 V 类水体.

$\rho$  ( $\text{NO}_3^-$ -N) 的范围为 0.22 ~ 5.21  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 均值为 1.68  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  [图 4(b)], 在丹河中游点位浓度较大.

$\rho$  ( $\text{NH}_4^+$ -N) 的范围为 0.04 ~ 2.82  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 均值为

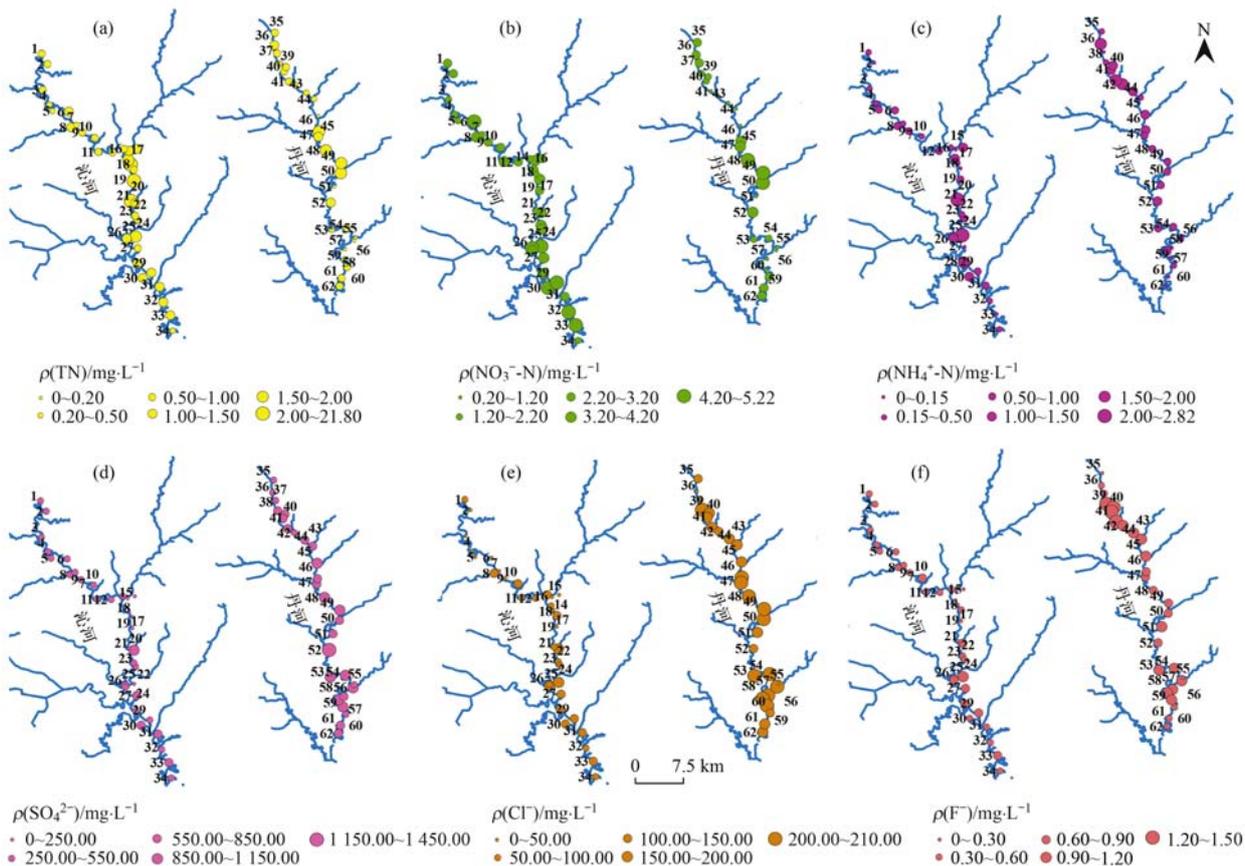


图 4 沁河晋城段水质化学参数空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of chemical variables in Qinhe River in Jincheng region

0.48 mg·L<sup>-1</sup> [图 4(c)], 沁河中下游和丹河上游点位浓度最大, 属于 V 类或劣 V 类水体. 整体来看, 沁河和丹河的氮污染状况比较严重, 均属于劣 V 类水体.  $\rho(\text{SO}_4^{2-})$  为 29.07 ~ 1437.89 mg·L<sup>-1</sup>, 均值为 208.77 mg·L<sup>-1</sup> [图 4(d)].  $\rho(\text{Cl}^-)$  的范围为 12.60 ~ 209.34 mg·L<sup>-1</sup>, 均值为 60.50 mg·L<sup>-1</sup> [图 4(e)].  $\rho(\text{F}^-)$  的范围为 0.55 ~ 1.39 mg·L<sup>-1</sup>, 均值为 0.58 mg·L<sup>-1</sup> [图 4(f)], 整体来看丹河的  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{F}^-$  和  $\text{Cl}^-$  的浓度都大于沁河, 说明丹河的工业污染较沁河重.

### 2.2.2 河岸缓冲区土地利用格局

各采样点河岸缓冲区 300 m 内耕地面积占比为 0 ~ 96.65%, 两河两侧都有大量的耕地. 农村聚落用地面积总占比为 0 ~ 77.88%, 主要分布在沁河的中下游和丹河的上游河岸(点位 8、11 ~ 23、35 ~ 38、40 ~ 42、49 ~ 53 和 58). 城镇建设用地面积占比 0 ~ 91.11%, 主要位于两河中游河岸(点位 10、18、19、37 ~ 39 和 43 ~ 45). 林地大面积分布在沁河(点位

29 ~ 34) 和丹河(点位 54 ~ 62) 的下游河岸, 占比为 0 ~ 100%. 草地主要在沁河上游河岸, 占比 0 ~ 65.90%. 水域占比 0 ~ 76.11% (图 5).

### 2.3 浮游植物群落结构与环境因子的关系

#### 2.3.1 关键水环境因子的提取

将沁河和丹河的水环境因子的数据经标准化, 再通过 Pearson 相关性分析发现(表 3): 沁河采集到的水体理化参数中  $\text{F}^-$  与  $\text{Cl}^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NH}_4^+$ -N 与 TN 和 TP 都呈极显著相关关系 ( $P < 0.01$ ), 故可保留  $\text{F}^-$ 、 $\text{NH}_4^+$ -N 和 TP, 选择 WT、pH 和  $\text{NO}_3^-$ -N 共 6 个水环境因子来进行下一步的 CCA 分析. 丹河采集到的水体理化参数中  $\text{Cl}^-$  和 COD 呈极显著正相关关系 ( $P < 0.01$ ),  $\text{Cl}^-$  和  $\text{F}^-$  呈正相关关系 ( $P < 0.05$ ),  $\text{NO}_3^-$ -N 和 TN 呈极显著正相关关系 ( $P < 0.01$ ),  $\text{NH}_4^+$ -N 和 TP 呈正相关关系 ( $P < 0.05$ ), 故可保留  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{NO}_3^-$ -N 和  $\text{NH}_4^+$ -N, 另外加上 WT、pH 和  $\text{SO}_4^{2-}$  共 6 个水环境因子作为影响丹河浮游植物的关键水环境因子进行下一步 CCA 分析.

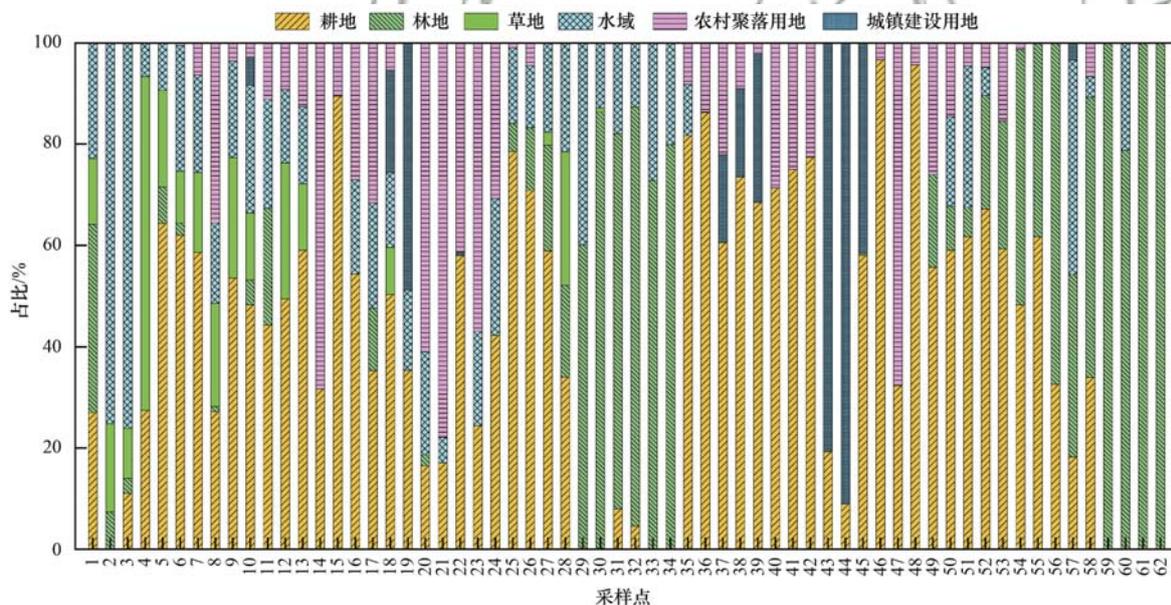


图 5 沁河晋城段采样点 300 m 河岸缓冲区土地利用占比

Fig. 5 Percentage of land cover of 300 m buffer at sampling sites in Qinhe River of Jincheng region

#### 2.3.2 浮游植物群落结构与环境因子的 CCA 分析

选择 WT、pH、 $\text{NH}_4^+$ -N、TP、 $\text{F}^-$  和  $\text{NO}_3^-$ -N 共 6 个水环境因子和耕地、城镇建设用地和农村聚落用地面积比例与沁河浮游植物优势种的密度进行 CCA 分析. 丹河选择 WT、pH、 $\text{NH}_4^+$ -N、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{NO}_3^-$ -N 共 6 个水环境因子和耕地、林地、草地、城镇建设用地和农村聚落用地面积比例与丹河浮游植物优势种的密度进行 CCA 分析. 沁河和丹河的 CCA 排序图表明前 3 轴的物种-环境关系累积百分比分别达到 89.64% 和 86.92%, 表明排序能够较好

地反映浮游植物与环境因子间的相互关系.

沁河 CCA 排序图显示河岸缓冲区林地面积比例是影响绿藻门绿球藻分布的主要驱动因子. 而绿色裸藻的分布主要受硝态氮、TP 和林地面积比例的影响. 具星小环藻的分布主要受城镇建设用地的面积比例的影响. 小球藻、嗜蚀隐藻和尖尾蓝隐藻主要分布受农村聚落用地和耕地面积比例的影响 [图 6(a)].

丹河 CCA 排序图显示嗜蚀隐藻和具星小环藻的分布主要受 pH 和硫酸盐影响最大. 绿色裸藻主

要受城镇建设和草地面积影响最大. 矩圆囊裸藻主要受林地面积和  $\text{Cl}^-$  影响最大. 史密斯胸隔藻的分

布主要受水温和耕地面积影响最大. 小球藻主要受氨氮和耕地面积影响最大[图 6(b)].

表 3 沁河和丹河水体理化参数的 Pearson 相关性分析

Table 3 Analysis of Pearson correlation of physiochemical variables in Qinhe River and Danhe River

河流	pH	WT	COD	$\text{NH}_4^+ \text{-N}$	TP	TN	$\text{F}^-$	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{NO}_3^- \text{-N}$
沁河	pH	1								
	WT	-0.201	1							
	COD	0.22	-0.015	1						
	$\text{NH}_4^+ \text{-N}$	0.065	0.17	0.213	1					
	TP	-0.093	-0.105	-0.157	0.453 **	1				
	TN	0.273	0.091	0.825 **	0.606 **	0.069	1			
	$\text{F}^-$	-0.162	-0.169	-0.685 **	0.073	0.551 **	-0.404 *	1		
	$\text{Cl}^-$	0.096	-0.351 *	-0.411 *	0.215	0.500 **	-0.129	0.714 **	1	
	$\text{SO}_4^{2-}$	0.019	-0.302	-0.405 *	-0.166	0.159	-0.287	0.554 **	0.444 **	1
	$\text{NO}_3^- \text{-N}$	0.182	0.023	-0.311	0.131	0.333	-0.067	0.528 **	0.401 *	0.274
丹河	pH	1								
	WT	-0.016	1							
	COD	0.401 *	0.105	1						
	$\text{NH}_4^+ \text{-N}$	-0.34	-0.023	0.123	1					
	TP	-0.178	-0.225	-0.025	0.466 *	1				
	TN	-0.079	0.446 *	0.307	0.13	-0.343	1			
	$\text{F}^-$	-0.034	-0.138	0.223	0.315	0.053	-0.308	1		
	$\text{Cl}^-$	0.238	0.291	0.551 **	-0.117	-0.185	0.051	0.398 *	1	
	$\text{SO}_4^{2-}$	-0.006	0.081	0.644 **	-0.017	-0.038	0.147	0.097	0.156	1
	$\text{NO}_3^- \text{-N}$	-0.033	0.498 **	0.209	-0.073	-0.342	0.895 **	-0.363	0.073	0.087

1) \* 表示  $P < 0.05$  级别(双尾检验), \*\* 表示  $P < 0.01$ (双尾检验)

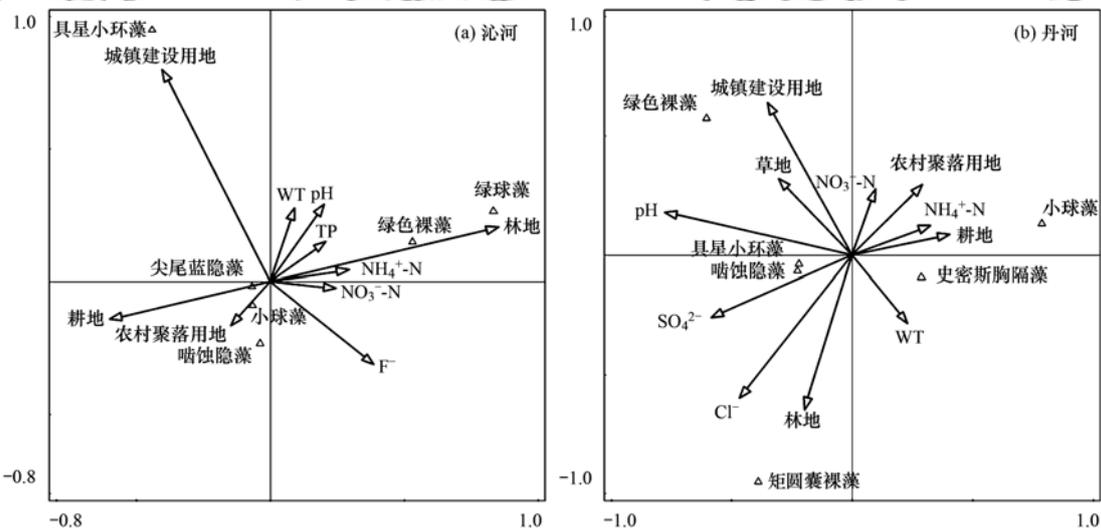


图 6 沁河晋城段浮游植物群落与环境因子的 CCA 排序

Fig. 6 CCA ordination plot between phytoplankton composition and environmental factors in Qinhe River of Jincheng region

### 3 讨论

不同河段中发现的浮游植物的种类密度和生物量存在差异, 晋城市沁河流域干流的浮游植物密度以绿藻(大于 76%)为主, 其支流丹河浮游植物密度以硅藻(大于 40%)为主. 近年来对我国的内陆河流调查发现, 硅藻门和绿藻门作为主要的优势类群, 在物种丰富度和密度上都处于主导地位<sup>[25~34]</sup>. 如渭河陕西段丰枯水期的硅藻门和绿藻门是优势类群, 物

种组成表现为绿藻-硅藻-蓝藻型<sup>[35]</sup>. 白洋淀汛期和非汛期的浮游植物是由绿藻和硅藻为主<sup>[36]</sup>. 北京北运河浮游植物的优势类群也是硅藻门和绿藻门<sup>[23]</sup>. 黑河张掖段浮游植物的优势类群是硅藻门<sup>[37]</sup>. 这说明沁河晋城段和国内大多数河流的浮游植物优势种类分布一致. 硅藻和绿藻适应不同温度和高营养盐浓度环境, 较易形成优势类群<sup>[38]</sup>. 浮游植物的优势种种数和其优势度对群落结构的稳定性亦有重要影响, 优势种种数越多且优势度越小, 说明群落结

构越复杂和越稳定.沁河和丹河的优势种数各为 6 个,主要优势物种为小球藻、绿色裸藻、嗜蚀隐藻和尖尾蓝隐藻等,说明沁河晋城段浮游植物群落结构相对较为简单.

所有采样河段绿藻门占比都比较稳定,这是因为绿藻无论在清洁水体还是在营养盐浓度较高的水体都可以大量生存,适应力较强.沁河浮游植物生物量高的物种多属于裸藻门、硅藻门和隐藻门,丹河浮游植物的生物量高的物种多属于裸藻门和硅藻门.沁河比丹河鉴定出的物种数多,但是丹河浮游植物的密度和生物量都远多于沁河.丹河浮游植物多样性指数和均匀度指数均高于沁河,丹河大多数点位都发现了 3 种以上硅藻门的物种,而沁河中游物种主要集中在绿藻门的小球藻,多样性和均匀度指数较低.丹河中下游点位浮游植物均匀度指数也较低,这些点位浮游植物物种的个数不一,主要是硅藻门的具星小环藻和隐藻门的嗜蚀隐藻,其他物种数较少.

水体中影响浮游植物生长的主要环境因子包括光照、温度和氮磷营养盐等,不同研究中影响浮游植物群落结构的环境因子也各有差别.影响汛期白洋淀浮游植物群落的主要驱动因子为 DO、高锰酸盐指数、总氮和总磷,非汛期为 DO、高锰酸盐指数、氨氮和总磷<sup>[36]</sup>.影响渭河陕西段枯水期浮游植物群落结构的主要环境因子是总磷、pH 和总溶解性固体,丰水期是总磷和高锰酸盐指数<sup>[35]</sup>.影响哈尔滨城市河网丰水期浮游植物群落分布特征的主要驱动因子是总磷和 pH<sup>[39]</sup>.本研究发现沁河绿球藻和绿色裸藻与硝酸盐和总磷浓度呈正相关关系,说明硝酸盐氮和磷酸盐是浮游植物生长繁殖的重要营养元素<sup>[40]</sup>,且高营养盐有利于沁河绿藻门优势物种的生长.有研究发现<sup>[41]</sup>,不同氮源对不同藻类影响生长因素不同,优势种为绿藻的水体一般硝酸盐含量较高.另有实验表明,在磷浓度较高时绿藻占优势,随着磷浓度降低,硅藻逐渐占优势<sup>[40]</sup>.另外,缓冲区林地面积比例对它们的分布也有较大影响,说明河岸缓冲区的林地分布对水质影响较为显著,尤其是对水体的氨氮、硝酸盐氮有较大的影响.沁河具星小环藻的密度与缓冲区城镇建设用地面积比例和水温呈正相关关系.水温是影响浮游植物生长发育以及丰度变化等的重要环境因子,硅藻门的具星小环藻属于高温种,生长的适宜温度在 30~40℃ 之间<sup>[42]</sup>.城镇建设用地的面积比例也是影响具星小环藻分布的驱动因子,说明随着城镇用地面积比例的增加,具星小环藻密度也会增加.本研究也发现城镇建设用地的分布对水体硝酸盐氮和氟离子的浓度有

显著影响,说明河岸城镇建设用地比例的变化会通过影响水质变化而间接影响浮游植物的生长.本研究发现沁河具星小环藻密度最大的点位位于城镇面积比例最高的点位 19,也充分说明城镇用地比例的增加会造成具星小环藻的生长繁殖.沁河小球藻、尖尾蓝隐藻和嗜蚀隐藻分布的主要驱动因子是缓冲区农村聚落用地比例和耕地面积比例.隐藻代表水体处于中富营养-重富营养状态<sup>[37]</sup>,嗜蚀隐藻主要出现在耕地面积较多的点位 15、16 和 26,尖尾蓝隐藻主要分布在耕地和农村用地面积较大的点位 6、7、11 和 14,说明沁河中上游的水质存在一定程度污染,可能是由于居民生活污水的排放以及农业非点源污染造成的.

有研究发现碱性条件有利于浮游植物进行光合作用<sup>[40]</sup>,在碱性水体中浮游植物具有较高的初级生产力.CCA 排序显示,丹河硅藻门的具星小环藻和隐藻门的嗜蚀隐藻丰度与 pH 关系显著,说明 pH 对丹河晋城段浮游植物的生产力具有较大影响.丹河硅藻门的具星小环藻和隐藻门的嗜蚀隐藻丰度与硫酸盐浓度呈显著正相关,说明具星小环藻和嗜蚀隐藻对工业废水的水体污染起重要指示作用,这与文献<sup>[42~45]</sup>的结论相似.硅藻门的史密斯胸膈藻丰度与水温呈正相关关系,说明丹河的史密斯胸膈藻属于高温藻类,适宜于温度较高的水体环境中.本研究中史密斯胸膈藻在水温耕地面积比例较大的点位(点位 38、41~42 和 55)丰度较高.绿藻门的小球藻与氨氮浓度和河岸缓冲区耕地面积比例呈正相关关系,说明水体氮磷营养物质对绿藻门的小球藻的分布有显著影响.本研究中发现氨氮浓度和耕地面积比例较大的点位(点位 35 和 36)小球藻密度较高.裸藻门的绿色裸藻与城镇建设用地呈正相关关系.裸藻属于污染指示种<sup>[46]</sup>,多出现在人类活动干扰较大的水体环境,且生物量较大<sup>[21]</sup>.本研究发现矩圆囊裸藻丰度较高的点位主要位于丹河的中下游耕地和林地面积比例较高的点位(点位 53~59).

#### 4 结论

(1)晋城市沁河流域共鉴定出 6 门 46 种浮游植物,沁河鉴定出浮游植物 6 门 29 种,丹河鉴定出浮游植物 6 门 36 种,其中以硅藻门与绿藻门为主,分别为 22 种和 12 种,分别占物种数的 46.8% 和 25.5%.沁河绿藻门的小球藻优势度最高,远高于其他物种.丹河硅藻门的具星小环藻优势度最高,隐藻门的嗜蚀隐藻为第二优势种.

(2)各采样点浮游植物 Shannon-Wiener ( $H'$ ) 的范围为 0.35~3.15,均值为 1.40. Pielou ( $J$ ) 的范围

是 0.24 ~ 1.00, 均值是 0.68. 沁河的最大支流丹河浮游植物多样性指数高于沁河干流, 沁河中游和丹河中下游浮游植物均匀度指数最低.

(3) 河岸缓冲区林地面积比例是影响沁河绿藻门绿球藻分布的主要驱动因子. 而绿色裸藻的分布主要受硝态氮、总磷和河岸林地面积比例的影响. 具星小环藻的分布主要受城镇建设用地的面积比例和温度的影响. 小球藻、啮蚀隐藻和尖尾蓝隐藻主要分布受农村聚落用地和耕地面积比例的影响.

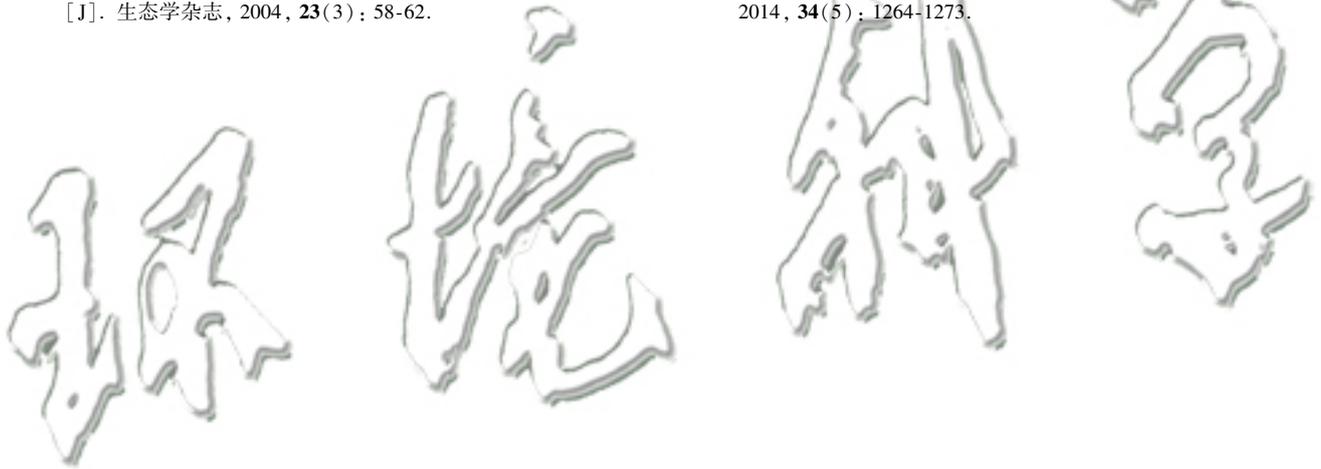
(4) 丹河啮蚀隐藻和具星小环藻的分布主要受 pH 和硫酸盐影响. 绿色裸藻主要受河岸城镇建设和草地面积影响. 矩圆囊裸藻主要受林地面积比例和  $\text{Cl}^-$  影响最大. 史密斯胸隔藻的分布主要受水温 and 耕地面积比例影响最大. 小球藻主要受氨氮和耕地面积影响最大.

#### 参考文献:

- [ 1 ] 李茜茜. 沁河流域晋城段水质评价及影响因素分析[D]. 太原: 山西财经大学, 2019.  
Li X X. Water quality assessment and influencing factor analysis in the Jincheng section of Qinhe River basin [D]. Taiyuan: Shanxi University of Finance and Economics, 2019.
- [ 2 ] 孟伟, 范俊韬, 张远. 流域水生态系统健康与生态文明建设[J]. 环境科学研究, 2015, **28**(10): 1495-1500.  
Meng W, Fan J T, Zhang Y. Freshwater ecosystem health and ecological civilization construction at the watershed scale [J]. Research of Environmental Sciences, 2015, **28**(10): 1495-1500.
- [ 3 ] Yuan Y X, Jiang M, Liu X T, *et al.* Environmental variables influencing phytoplankton communities in hydrologically connected aquatic habitats in the Lake Xingkai basin [J]. Ecological Indicators, 2018, **91**: 1-12.
- [ 4 ] Zhang S S, Xu H Z, Zhang Y F, *et al.* Variation of phytoplankton communities and their driving factors along a disturbed temperate river-to-sea ecosystem [J]. Ecological Indicators, 2020, **118**, doi: 10.1016/j.ecolind.2020.106776.
- [ 5 ] Bowes M J, Gozzard E, Johnson A C, *et al.* Spatial and temporal changes in chlorophyll-*a* concentrations in the River Thames basin, UK: are phosphorus concentrations beginning to limit phytoplankton biomass? [J]. Science of the Total Environment, 2012, **426**: 45-55.
- [ 6 ] 孙玉平, 于恒国, 周钦, 等. 典型富营养化城市河流——浙江温瑞塘河的浮游植物群落类型与季节变化[J]. 湖泊科学, 2018, **30**(2): 375-384.  
Sun Y P, Yu H G, Zhou Q, *et al.* Seasonal variation of phytoplankton communities in Wenrui Tang River—A typical eutrophic urban river, Zhejiang Province [J]. Journal of Lake Sciences, 2018, **30**(2): 375-384.
- [ 7 ] 胡芳, 许振成, 姚玲爱, 等. 剑潭水库浮游植物群落特征与水环境因子关系研究[J]. 环境科学学报, 2014, **34**(4): 950-958.  
Hu F, Xu Z C, Yao L A, *et al.* Community structure of phytoplankton and its relationship with aquatic environment factors in Jiantan Reservoir [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, **34**(4): 950-958.
- [ 8 ] Dodds W K, Bouska W W, Eitzmann J L, *et al.* Eutrophication of U.S. freshwaters: analysis of potential economic damages [J]. Environmental Science & Technology, 2009, **43**(1): 12-19.
- [ 9 ] Torremorell A, Llames M E, Pérez G L, *et al.* Annual patterns of phytoplankton density and primary production in a large, shallow lake: the central role of light [J]. Freshwater Biology, 2009, **54**(3): 437-449.
- [ 10 ] Tian C, Lu X T, Pei H Y, *et al.* Seasonal dynamics of phytoplankton and its relationship with the environmental factors in Dongping Lake, China [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2013, **185**(3): 2627-2645.
- [ 11 ] Guo K, Wu N C, Wang C, *et al.* Trait dependent roles of environmental factors, spatial processes and grazing pressure on lake phytoplankton metacommunity [J]. Ecological Indicators, 2019, **103**: 312-320.
- [ 12 ] 程荣, 陈惠鑫, 亓畅, 等. 北运河流域沙河水库的浮游生物群落特征分析[J]. 环境科学学报, 2021, **41**(1): 239-246.  
Cheng R, Chen H X, Qi C, *et al.* Characteristics of plankton community structure in Shahe Reservoir of the North Canal [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, **41**(1): 239-246.
- [ 13 ] 杨敏, 张晟, 刘朔孺. 草街水库蓄水后嘉陵江浮游植物群落特征及水质评价[J]. 环境科学, 2015, **36**(7): 2480-2486.  
Yang M, Zhang S, Liu S R. Phytoplankton community structure and water quality assessment in Jialing River after the impoundment of Caojie Reservoir [J]. Environmental Science, 2015, **36**(7): 2480-2486.
- [ 14 ] 许志, 陈小华, 沈根祥, 等. 上海河道浮游植物群落结构时空变化特征及影响因素分析[J]. 环境科学, 2020, **41**(8): 3621-3628.  
Xu Z, Chen X H, Shen G X, *et al.* Spatial and temporal variation of phytoplankton community structure and its influencing factors in Shanghai River channels [J]. Environmental Science, 2020, **41**(8): 3621-3628.
- [ 15 ] Shen J C, Qin G, Yu R D, *et al.* Urbanization has changed the distribution pattern of zooplankton species diversity and the structure of functional groups [J]. Ecological Indicators, 2021, **120**, doi: 10.1016/j.ecolind.2020.106944.
- [ 16 ] 刘存歧, 孔祥玲, 张治荣, 等. 基于 RDA 的白洋淀浮游植物群落动态特征分析[J]. 河北大学学报(自然科学版), 2016, **36**(3): 278-285.  
Liu C Q, Kong X L, Zhang Z R, *et al.* Dynamics of phytoplankton community in Baiyangdian Lake based on the redundancy analysis (RDA) [J]. Journal of Hebei University (Natural Science Edition), 2016, **36**(3): 278-285.
- [ 17 ] 陶敏, 王永明, 谢碧文, 等. 沱江浮游生物群落时空分布及相关环境因子分析[J]. 水生生物学报, 2016, **40**(2): 301-312.  
Tao M, Wang Y M, Xie B W, *et al.* Spatio-temporal distribution of plankton and driving environmental factors in the Tuojiang River [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2016, **40**(2): 301-312.
- [ 18 ] 孙丽梅, 汪文东, 高凤, 等. 宁波市某人工泻湖浮游生物变化特征及影响因素分析[J]. 生态毒理学报, 2018, **13**(4): 60-67.  
Sun L M, Wang W D, Gao F, *et al.* Distribution and influencing factors of plankton in an artificial lagoon in Ningbo [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2018, **13**(4): 60-67.
- [ 19 ] 陈红, 刘清, 潘建雄, 等. 瀾河城市段浮游生物群落结构时空变化及其与环境因子的关系[J]. 生态学报, 2019, **39**(1): 173-184.  
Chen H, Liu Q, Pan J X, *et al.* Spatial and temporal variation of the plankton community and its relationship with environmental factors in the city section of the Ba River [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, **39**(1): 173-184.

- [20] 王玉芬, 蔡李平. 晋城市地表水环境质量研究 [A]. 见: 2019 中国环境科学学会科学技术年论文集(第二卷) [C]. 西安: 中国环境科学学会, 2019. 1443-1449.
- [21] 王汨, 马思琦, 杨柏贺, 等. 北运河水系秋季浮游植物群落与水环境因子的关系 [J]. 水产科技情报, 2019, **46**(3): 176-180.
- [22] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 [M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [23] 贺玉晓, 刘天慧, 任玉芬, 等. 北运河秋冬季浮游植物群落结构特征及影响因子分析 [J]. 环境科学学报, 2020, **40**(5): 1710-1721.  
He Y X, Liu T H, Ren Y F, *et al.* Characteristics and influencing factors of phytoplankton community structure in autumn and winter of the North Canal, Beijing [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40**(5): 1710-1721.
- [24] 刘珍妮, 夏霆, 孙淑文, 等. 苏北运东水网区浮游植物群落结构特征与环境因子的关系 [J]. 水生态学杂志, 2019, **40**(6): 45-53.  
Liu Z N, Xia T, Sun S W, *et al.* Phytoplankton community structure and its relationship with environment factors in the Yundong River network of Northern Jiangsu [J]. *Journal of Hydroecology*, 2019, **40**(6): 45-53.
- [25] 邱阳凌, 林育青, 刘俊杰, 等. 淮河干流及主要支流夏季浮游植物群落生物多样性评价 [J]. 环境科学学报, 2018, **38**(4): 1665-1672.  
Qiu Y L, Lin Y Q, Liu J J, *et al.* The biodiversity assessment of phytoplankton community in summer within main stream and tributary of Huaihe River [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(4): 1665-1672.
- [26] 马煜, 陆欣鑫, 范亚文. 松花江哈尔滨段浮游植物群落格局及其与环境因子的相关性 [J]. 生态学报, 2021, **41**(1): 224-234.  
Ma Y, Lu X X, Fan Y W. Correlation between phytoplankton community patterns and environmental factors in Harbin section of the Songhua River [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, **41**(1): 224-234.
- [27] 朱利英, 陈媛媛, 刘静, 等. 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 [J]. 环境科学, 2020, **41**(2): 702-712.  
Zhu L Y, Chen Y Y, Liu J, *et al.* Spatio-temporal evolution and relationship of water environment quality and phytoplankton community in Wenyu River [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(2): 702-712.
- [28] 胡智华, 林妙丽, 李港, 等. 城市闸控河流浮游植物群落结构特征及影响因素 [J]. 环境科学学报, 2021, **41**(9): 3631-3640.  
Hu Z H, Lin M L, Li G, *et al.* Phytoplankton community characteristics and influencing factors of the urban gate-controlled rivers [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, **41**(9): 3631-3640.
- [29] 王昊, 潘保柱, 赵耿楠, 等. 洞庭湖春秋浮游植物群落结构及其与环境因子的关系 [J]. 长江流域资源与环境, 2021, **30**(11): 2659-2669.  
Wang H, Pan B Z, Zhao G N, *et al.* Community characteristics of phytoplankton and its relationship with environmental factors in spring and autumn in Dongting Lake [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2021, **30**(11): 2659-2669.
- [30] 王远飞, 周存通, 赵增辉, 等. 亚热带水库浮游植物季节动态及其与环境因子的关系 [J]. 生态学报, 2021, **41**(10): 4010-4022.  
Wang Y F, Zhou C T, Zhao Z H, *et al.* Seasonal dynamics of phytoplankton and its relationship with the environmental factors in subtropical reservoirs [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, **41**(10): 4010-4022.
- [31] 张春梅, 朱宇轩, 宋高飞, 等. 南水北调中线干渠浮游植物群落时空格局及其决定因子 [J]. 湖泊科学, 2021, **33**(3): 675-686.  
Zhang C M, Zhu Y X, Song G F, *et al.* Spatiotemporal pattern of phytoplankton community structure and its determining factors in the channel of the middle route of South-to-North water diversion project [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2021, **33**(3): 675-686.
- [32] 杨宋琪, 高兴亮, 王丽娟, 等. 西北干旱区典型水库浮游植物群落结构特征及驱动因子 [J]. 湖泊科学, 2021, **33**(2): 377-387.  
Yang S Q, Gao X L, Wang L J, *et al.* Phytoplankton community structure and driving factors in typical reservoirs of arid region of northwest China [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2021, **33**(2): 377-387.
- [33] 赵秀侠, 卢文轩, 梁阳阳, 等. 安徽三座通江湖泊秋季浮游植物群落结构特征及其影响因子 [J]. 生态学杂志, 2021, **40**(1): 67-75.  
Zhao X X, Lu W X, Liang Y Y, *et al.* Community structure of phytoplankton and affecting factors in autumn in three Yangtze River-connected lakes, Anhui, China [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, **40**(1): 67-75.
- [34] 郭杰, 王珂, 段辛斌, 等. 长江荆江段浮游生物群落结构特征及其与环境因子的关系 [J]. 长江流域资源与环境, 2020, **29**(9): 1954-1964.  
Guo J, Wang K, Duan X B, *et al.* Characteristics of plankton community and its relationships with environmental factors in the Jingjiang reach of the Yangtze River [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2020, **29**(9): 1954-1964.
- [35] 白海锋, 王怡睿, 宋进喜, 等. 渭河陕西段浮游植物群落结构时空变化与影响因子分析 [J]. 环境科学学报, 2021, **41**(8): 3290-3301.  
Bai H F, Wang Y R, Song J X, *et al.* Spatio-temporal characteristics and influencing factors of phytoplankton community structure in the Shaanxi section of Weihe River, China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, **41**(8): 3290-3301.
- [36] 李娜, 周绪申, 孙博闻, 等. 白洋淀浮游植物群落的时空变化及其与环境因子的关系 [J]. 湖泊科学, 2020, **32**(3): 772-783.  
Li N, Zhou X S, Sun B W, *et al.* Spatiotemporal variation of phytoplankton community and its relationship with environmental factors in the Lake Baiyangdian [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2020, **32**(3): 772-783.
- [37] 杨宋琪, 祖廷勋, 王怀斌, 等. 黑河张掖段浮游植物群落结构及其与环境因子的关系 [J]. 湖泊科学, 2019, **31**(1): 159-170.  
Yang S Q, Zu T X, Wang H B, *et al.* Relationship between the structure of phytoplankton community and environmental factors in the Zhangye section of Heihe River [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2019, **31**(1): 159-170.
- [38] Boyd P W, Law C S, Wong C S, *et al.* The decline and fate of an iron-induced subarctic phytoplankton bloom [J]. *Nature*, 2004, **428**(6982): 549-553.
- [39] 路枫, 李磊, 齐青松, 等. 哈尔滨城市河网丰水期浮游植物群落分布特征及驱动因子 [J]. 环境科学, 2021, **42**(7): 3253-3262.  
Lu F, Li L, Qi Q S, *et al.* Distribution characteristics and influencing factors of phytoplankton community in Harbin urban

- river network during wet season [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(7): 3253-3262.
- [40] 刘俊鹏, 屈亮, 刘信勇, 等. 不同营养条件对地表水藻类生长的影响[J]. *环境工程*, 2016, **34**(S1): 407-410.  
Liu J P, Qu L, Liu X Y, *et al.* Effects of different nutrient conditions on the growth of algae in surface water [J]. *Environmental Engineering*, 2016, **34**(S1): 407-410.
- [41] 刘春光, 金相灿, 孙凌, 等. 不同氮源和曝气方式对淡水藻类生长的影响[J]. *环境科学*, 2006, **27**(1): 101-104.  
Liu C G, Jin X C, Sun L, *et al.* Effects of nitrogen source and aeration mode on algae growth in freshwater [J]. *Environmental Science*, 2006, **27**(1): 101-104.
- [42] 姜登岭, 赵昊, 邬喜红, 等. 嘉兴城市河网区高、低水位期浮游植物群落及其与环境因子的典范对应分析[J]. *环境化学*, 2020, **39**(9): 2540-2550.  
Jiang D L, Zhao H, Wu X H, *et al.* Model correspondence analysis of phytoplankton community and its environmental factors at high and low water levels in urban river network area of Jiaxing City [J]. *Environmental Chemistry*, 2020, **39**(9): 2540-2550.
- [43] 王翠红, 张金屯. 汾河水库及河道中优势硅藻生态位的研究[J]. *生态学杂志*, 2004, **23**(3): 58-62.  
Wang C H, Zhang J T. Niche analysis of diatoms in Fenhe river and Fenhe reservoir [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2004, **23**(3): 58-62.
- [44] 孙雅薇. 七星河自然保护区浮游生物功能群研究及水质评价[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2019. 30-50.  
Sun Y W. Research on plankton functional groups and water quality evaluation in qixinghe nature reserve [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2019. 30-50.
- [45] 孔晓乐, 王仕琴, 赵焕, 等. 华北低平原区地下水中氟分布特征及形成原因: 以南皮县为例[J]. *环境科学*, 2015, **36**(11): 4051-4059.  
Kong X L, Wang S Q, Zhao H, *et al.* Distribution characteristics and source of fluoride in groundwater in lower plain area of North China Plain: a case study in Nanpi County [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(11): 4051-4059.
- [46] 陆欣鑫, 刘妍, 范亚文. 呼兰河湿地夏、秋两季浮游植物功能分组演替及其驱动因子[J]. *生态学报*, 2014, **34**(5): 1264-1273.  
Lu X X, Liu Y, Fan Y W. Relationships between environmental variables and seasonal succession in phytoplankton functional groups in the Hulan River Wetland [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, **34**(5): 1264-1273.



## CONTENTS

Temporal and Spatial Variation Characteristics of Heavy Metal in Atmospheric Deposition in China from 2000 to 2018 .....	CHEN Qi-yong, GAO Yun-bing, NI Run-xiang, <i>et al.</i> (4413)
Simulation of PM <sub>2.5</sub> Concentration Based on Optimized Indexes of 2D/3D Urban Form .....	LI Sha, ZOU Bin, LIU Ning, <i>et al.</i> (4425)
Characteristics of Carbonaceous Species in PM <sub>2.5</sub> in Chengdu Under the Background of Emission Reduction .....	CHEN Lu-yao, YU Yang-chun, HUANG Xiao-juan, <i>et al.</i> (4438)
Characteristics and Health Risk Assessment of Trace Elements in Atmospheric PM <sub>1</sub> During Autumn and Winter in Qingdao .....	LIU Zi-yang, ZHANG Yi-sheng, ZHANG Hou-yong, <i>et al.</i> (4448)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Atmospheric PM <sub>2.5</sub> -bound Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Port Area .....	WANG Peng-cheng, YANG Ling-xiao, BIE Shu-jun, <i>et al.</i> (4458)
Size Distribution and Source Apportionment of Road Particles During Winter in Tianjin .....	ZHANG Guo-tao, YIN Bao-hui, BAI Wen-yu, <i>et al.</i> (4467)
Characteristics and Impact Factors of Number Concentration of Primary Biological Aerosol Particles in Beijing .....	LIANG Lin-lin, LIU Chang, LIU Xu-yan, <i>et al.</i> (4475)
Characteristic Analysis and Source Apportionment of VOCs in Urban Areas of Beijing in Summer .....	MENG Xiang-lai, SUN Yang, LIAO Ting-ting, <i>et al.</i> (4484)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds (VOCs) in a Typical Industrial Area in Dongguan During Periods of Ozone and Non-ozone Pollution in Summer .....	ZHOU Zhen, XIAO Lin-hai, FEI Lei-lei, <i>et al.</i> (4497)
Temporal and Spatial Variation in Odor Pollution and Membrane Barrier Effect in Municipal Solid Waste Landfill .....	HE Pin-jing, LI Jian-chen, LÜ Fan, <i>et al.</i> (4506)
Comparison of Health Risk from Sources of Perfluoroalkyl Substances in Taihu Lake for Different Years .....	WU Ting, SUN Shan-wei, FAN Jing-pu, <i>et al.</i> (4513)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Typical and Emerging Per- and Polyfluoroalkylated Substances in Tuojiang River Basin .....	SONG Jiao-jiao, WANG Yi-mei, SUN Jing, <i>et al.</i> (4522)
Speciation and Risk of Heavy Metals in Surface Sediments of Different Types of Water Bodies in Baiyangdian Lake .....	XU Meng-ya, ZHANG Chao, SHAN Bao-qing, <i>et al.</i> (4532)
Distribution Coefficient of QNs in Urban Typical Water and Its Main Environmental Influencing Factors .....	JU Ze-jia, FU Yu, ZHAO Xin-yu, <i>et al.</i> (4543)
Ecological Risk Assessment of Quinolones Antibiotics and the Correlation Analysis Between QNs and Physical-Chemical Parameters in Groundwater, Shijiazhuang City .....	CHEN Hui, JU Ze-jia, ZHAO Xin-yu, <i>et al.</i> (4556)
Characteristics and Sources of DOM in Lake Sediments Under Different Inundation Environments .....	CHEN Jia, LI Zhong-wu, JIN Chang-sheng, <i>et al.</i> (4566)
Characteristics of Phytoplankton Community Structure and Their Relationships with Environmental Factors in Autumn in Qinhe River Basin of Jincheng Region .....	GAO Meng-die, LI Yan-fen, LI Yan-li, <i>et al.</i> (4576)
Integrated Assessment of Runoff Quality from Green Roofs with Different Configurations .....	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, YAN Jing, <i>et al.</i> (4587)
Degradation of Chloroquine Phosphate by UV-activated Persulfate .....	LI Yang, XU Bo-hui, DENG Lin, <i>et al.</i> (4597)
Removal Performance of Suspended Solid (SS) and Organic Compounds in the Pre-treatment of Actual Pharmaceutical Wastewater by Microbubble Ozonation .....	LIU Chun, CHEN Rui, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (4608)
Effects of Wastewater Discharge on Antibiotic Resistance Genes and Microbial Community in a Coastal Area .....	CHEN Jia-yu, SU Zhi-guo, YAO Peng-cheng, <i>et al.</i> (4616)
Effects of Biochar and Straw Returning on Soil Fungal Community Structure Diversity in Cotton Field with Long-term Brackish Water Irrigation .....	GUO Xiao-wen, CHEN Jing, LU Xiao-yu, <i>et al.</i> (4625)
Effects of Organic Materials on Phosphorus Fractions and <i>phoD</i> -harboring Bacterial Community in Karst Soil .....	XIA Xin, QIAO Hang, SUN Qi, <i>et al.</i> (4636)
Effects of Different Vegetation Types on Soil Microbial Functional Genes and Enzyme Activities in Reclaimed Coal Mine .....	NING Yue-wei, LIU Yong, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (4647)
Effects of Biochar Application on Yellow Soil Nutrients and Enzyme Activities .....	YUAN Fang, LI Kai-yu, YANG Hui, <i>et al.</i> (4655)
Changes in Soil Bacterial Community Diversity in Degraded Patches of Alpine Meadow in the Source Area of the Yellow River .....	SUN Hua-fang, LI Xi-lai, JIN Li-qun, <i>et al.</i> (4662)
Effects of Simulated Nitrogen Deposition on Soil Microbial Carbon Metabolism in <i>Calamagrostis angustifolia</i> Wetland in Sanjiang Plain .....	WENG Xiao-hong, SUI Xin, LI Meng-sha, <i>et al.</i> (4674)
Spatial Distribution of Quinolone Antibiotics and Its Correlation Relationship with Microbial Community in Soil of Shijiazhuang City .....	ZHAO Xin-yu, JU Ze-jia, CHEN Hui, <i>et al.</i> (4684)
Composition Characteristics and Construction Mechanism of Microbial Community on Microplastic Surface in Typical Redox Environments .....	GONG Zhi-wei, MA Jie, SU Qu, <i>et al.</i> (4697)
Annual Nitrogen Removal Efficiency and Change in Abundance of Nitrogen Cycling Microorganisms in Swine Wastewater Treated by Crop Straw Materials .....	LIU Ming-yu, XIA Meng-hua, JIANG Lei, <i>et al.</i> (4706)
Effects of External Carbon Sources on Ultimate Nitrogen Removal Performance and Microbial Community in Secondary Effluent Treating Process .....	WANG Wei, ZHAO Zhong-yuan, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (4717)
Microbial Community Structure of Activated Sludge for Total Nitrogen Upgrading Project .....	LI Hai-song, WANG Ke-dan, CHEN Xiao-lei, <i>et al.</i> (4727)
Analysis of Microbial Interaction Law of Mud Membrane in IFAS Process for Treating Low Carbon Source Sewage in South China .....	HE Jun-guo, JIANG Wei-xun, HE Zhuo-yi, <i>et al.</i> (4736)
Abundances and Morphology Patterns of Microplastics Under Different Land Use Types on the Loess Plateau .....	HAO Yong-li, HU Ya-xian, BAI Xiao-xiong, <i>et al.</i> (4748)
Evaluation of Heavy Metal Content, Sources, and Potential Ecological Risks in Soils of Southern Hilly Areas .....	WANG Yu, XIN Cun-lin, YU Shi, <i>et al.</i> (4756)
Risk Assessment and Attribution Analysis of "Five Toxic" Heavy Metals in Cultivated Land in Lanzhou .....	ZHANG Li-rui, PENG Xin-bo, MA Yan-long, <i>et al.</i> (4767)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Farmland Soils and Crops in Luancheng, Shijiazhuang City .....	MENG Xiao-fei, GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, <i>et al.</i> (4779)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Antimony in Typical Urban Soil .....	SHEN Cheng, YE Wen-juan, QIAN Shi-ying, <i>et al.</i> (4791)
Contamination Assessment and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in Typical Villages and Towns in a Nonferrous Metal Mining City .....	WANG Feng, HUANG Yan-huan, LI Ru-zhong, <i>et al.</i> (4800)
Effect of Citric Acid and Mowing on Enhancing the Remediation of Cadmium Contaminated Soil by Napier Grass ( <i>Pennisetum purpureum</i> Schum) .....	TANG Qi, WU Gang-fan, GU Jiao-feng, <i>et al.</i> (4810)
Arsenic Methylation Efficiency Changes During Paddy Soil Drying and Its Key Influencing Factors Analysis .....	ZHANG Yue, LI Ling-yi, WEN Jiong, <i>et al.</i> (4820)
Effects of Exogenous Jasmonic Acid on Arsenic Accumulation and Response to Stress in Roots of Rice Seedlings .....	LI Yan, HUANG Yi-zong, BAO Qiong-li, <i>et al.</i> (4831)
Effects of Straw Returning and Fertilizer Application on Soil Nutrients and Winter Wheat Yield .....	SONG Jia-jie, XU Xi-yang, BAI Jin-ze, <i>et al.</i> (4839)
Effect of Winter Cover Cropping on Soil Greenhouse Gas Emissions in a Dryland Spring Maize Field on the Loess Plateau of China .....	ZHANG Shao-hong, WANG Jun, FANG Zhen-wen, <i>et al.</i> (4848)
Detection of Influencing Factors of Spatial Variability of Soil Respiration in Pangqiangou Nature Reserve .....	LI Xiao-min, YAN Jun-xia, DU Zi-qiang, <i>et al.</i> (4858)
Temporal and Spatial Variation Characteristics of Methane, Carbon Dioxide, and Nitrous Oxide Concentrations and the Influencing Factors in Small Aquaculture Pond .....	SHI Jie, ZHANG Mi, QIU Ji-li, <i>et al.</i> (4867)
Effect of Butyl Xanthate on Pb <sup>2+</sup> and Cd <sup>2+</sup> Adsorption by Soil Around a Dressing Plant .....	HU Zhi-hao, GUO Zhao-hui, RAN Hong-zhen, <i>et al.</i> (4878)
Sorption Mechanism and Site Energy Distribution of Acetaminophen on Straw-derived Biochar .....	SHANG Cen-yao, GU Ruo-ting, ZHANG Qiang, <i>et al.</i> (4888)
Spatial-temporal Variations and Their Driving Forces of the Ecological Vulnerability in the Loess Plateau .....	ZHANG Liang-xia, FAN Jiang-wen, ZHANG Hai-yan, <i>et al.</i> (4902)
Mechanism and Application of Plant Growth-Promoting Bacteria in Heavy Metal Bioremediation .....	MA Ying, WANG Yue, SHI Xiao-jun, <i>et al.</i> (4911)