Eco-Environmental Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

升金湖水体优先污染物筛选与风险评价

龚雄虎，丁琪琪，金苗，薛滨，张路，姚书春，王兆德，卢少勇，赵中华

PAHs VOCs PCBs HMs PAEs OCPs ANTs

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社

2021年10月
第42卷 第 10 期
Vol.42 No.10

环 境 科 学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第 42 卷 第 10 期
2021 年 10 月 15 日

目 次

$PM_{2.5}$化学组分连续观测在污染事件源解析中的应用 …… 蔡凡涛, 尚玥, 戴维, 谢鸣捷(4575)
汾渭平原 $PM_{2.5}$空间分布的地形效应 …… 黄小刚, 赵景波, 孙从建, 汤慧玲, 梁旭琦(4582)
华中地区冬季灰霾天气下 $PM_{2.5}$中重金属污染特征及健康风险评价: 以湖北黄冈为例 …… 李星谕, 毛瑶, 陈展乐, 刘威杰, 程铖, 石明明, 许安, 苏业旺, 胡天鹏, 祁士华, 邢新丽(4593)
华北区域大气中羰基化合物体积分数水平及化学反应活性 …… 黄禹, 陈曦, 王迎红, 刘子锐, 唐贵谦, 李杏茹(4602)
成都市春季 O_3 污染特征及关键前体物识别 …… 韩丽, 陈军辉, 姜涛, 徐晨曦, 李英杰, 王成辉, 王波, 钱骏, 刘政(4611)
基于边界观测的长三角某工业区 O_3 来源特征 …… 黄晴, 黄银芝, 张珊, 金丹, 高松, 修光利(4621)
廊坊开发区 8~9 月 O_3 污染过程 VOCs 污染特征及来源分析 …… 张敬巧, 王宏亮, 方小云, 刘锐泽, 丁文文, 凌德印, 王淑兰(4632)
广东省家具行业基于涂料类型的 VOCs 排放特征及其环境影响 …… 曾春玲, 邵霞, 刘锐源, 姚懿娟, 李银松, 侯墨, 刘洋, 范丽雅, 叶代启(4641)
厦门湾空气质量对新冠疫情管控的响应 …… 徐超, 吴水平, 刘怡靖, 钟雪芬(4650)
北京平原和延庆地区山谷风异同及对污染的影响 …… 吴进, 李琛, 马志强, 孙兆彬, 韩婷婷, 邱雨露, 马小会, 李颖若, 朱晓婉(4660)
两湖盆地冬季区域大气颗粒物污染特征及独特的风场和下垫面影响 …… 朱燕, 赵天良, 白永清, 徐家平, 孙晓芸, 胡未央, 常嘉成, 杨婕, 朱从祯(4669)
燃煤电厂颗粒物中硫酸根与硝酸根离子的转化规律 …… 杨柳, 何晴, 盛重义(4678)
长江流域主要干/支流水化学特征及外源酸的影响 …… 王琪, 于奭, 蒋萍萍, 孙平安(4687)
土地利用对太湖入流河道营养盐的影响 …… 连心桥, 朱广伟, 杨文斌, 康丽娟, 朱梦圆, 许海(4698)
基于 eDNA 技术的渭河浮游动物多样性及关键种生态位特征 …… 梁东, 夏军, 宋进喜, 常剑波, 吴琼, 程丹东, 张怡晅, 孔飞鹤, 任源鑫(4708)
三亚市水体中 PPCPs 的污染水平、分布特征及生态风险评价 …… 任丙南, 耿静(4717)
升金湖水体优先污染物筛选与风险评价 …… 龚雄虎, 丁琪琪, 金苗, 薛滨, 张路, 姚书春, 王兆德, 卢少勇, 赵中华(4727)
天目湖沙河水库水生态安全状况长期变化及影响因素 …… 杨文斌, 段文秀, 崔扬, 朱广伟, 吴天浩, 许海, 朱梦圆(4739)
华中地区供水水库抗生素抗性基因的季节变化及影响因素 …… 张凯, 辛蕊, 李贶家, 王倩, 王亚南, 许智恒, 崔向超, 魏巍(4753)
快速城镇化进程中珠江三角洲硝酸型地下水赋存特征及驱动因素 …… 吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 朱亮, 张玉玺(4761)
盐城地区地表水化学空间特征及控制因素分析 …… 王建, 张华兵, 许君利, 彭俊(4772)
基于沉积物中总氮和总磷垂向分布与吸附解吸特征的白洋淀清淤深度 …… 周亚婷, 陈兴宏, 李立青, 张伟军, 张美一, 王东升, 王洪杰(4781)
硼酸和磷酸对 PMS/Co^{2+} 均相催化氧化有机物的影响因素与机制 …… 万琪琪, 陈铸昊, 曹瑞华, 王静怡, 文刚(4789)
磁性生物炭负载 α-MnO_2 活化过一硫酸盐降解2,2′,4,4′-四溴联苯醚 …… 李鑫, 尹华, 罗昊昱, 欧阳晓芳, 刘航, 祝铭韩(4798)
紫外活化过硫酸钠灭活水中噬菌体 MS2 的特性及机制 …… 张崇淼, 杨昊明, 王真(4807)
铈改性水葫芦生物炭对磷酸盐的吸附特性 …… 王光泽, 曾薇, 李帅帅(4815)
低温地下水净化工艺中氨氮去除性能及机制 …… 李冬, 刘孟浩, 张瑞苗, 曾辉平, 张杰(4826)
我国城市污泥中重金属的赋存形态与生态风险评价 …… 耿源濛, 张传兵, 张勇, 黄豆豆, 闫姝骁, 孙腾飞, 程柳, 王静, 毛宇翔(4834)
不同气候类型下污水厂活性污泥中微生物群落比较 …… 杨思航, 秦泽生, 梁漫春(4844)
部分亚硝化-厌氧氨氧化协同反硝化处理生活污水脱氮除碳 …… 秦彦荣, 袁忠玲, 张明, 张民安, 刘安迪, 付雪, 马娟, 陈永志(4853)
同步短程硝化-厌氧氨氧化-短程反硝化颗粒污泥培育过程及其性能 …… 周锋, 刘勇弟, 厉巍(4864)
多种微塑料提取方法在中国典型土壤中的应用 …… 赵小丽, 刘子涵, 从辰宇, 韩剑桥(4872)
柴达木盆地表土重金属污染与来源分析 …… 陈亮, 张西营, 唐启亮, 耿鋆, 王二龙, 李姜瑶(4880)
快速城市化区域不同用地类型土壤重金属含量分布特征及生态风险 …… 李梦婷, 沈城, 吴健, 黄沈发, 李大雁, 王敏(4889)
广西都安县典型水田硒地球化学特征及影响因素 …… 刘飞, 杨柯, 徐仁廷, 唐世琪(4897)
炭化苹果枝通过减少土壤 DTPA-Cd 降低苹果砧木镉积累和镉伤害 …… 邓波, 荀咪, 张玮玮, 杨洪强(4908)
海南省集约化种植园中谷物、蔬菜和水果中重金属累积程度及健康风险 …… 杨剑洲, 王振亮, 高健翁, 严慧, 胡树起, 唐世新, 龚晶晶(4916)
环境中抗生素抗性基因丰度与抗生素和重金属含量的相关性分析: 基于 Web of Science 数据库检索 …… 苗荪, 陈磊, 左剑恶(4925)
银川市农田土壤中四环素类抗生素的污染特征及生态风险评估 …… 张小红, 陶红, 王亚娟, 马志义, 周泽英(4933)
施用不同来源粪肥对土壤中抗生素淋溶的影响 …… 李斌绪, 朱昌雄, 宋婷婷, 马金莲, 张治国, 李红娜(4942)
我国典型森林土壤微生物驱动的氮代谢途径特征解析 …… 吕雪丽, 赵永鹏, 林清火, 彭显龙, 尹云锋, 蒋先军(4951)
青藏高原高寒湿地春夏两季根际与非根际土壤反硝化速率及 *nirS* 型反硝化细菌群落特征分析 …… 李玉倩, 马俊伟, 高超, 霍守亮, 夏星辉(4959)
松嫩平原芦苇湿地退化与修复过程中土壤细菌和甲烷代谢微生物的群落结构 …… 王秋颖, 王娜, 刘颖, 陈功, 何辉, 高婕, 庄绪亮, 庄国强(4968)
不同轮作休耕下潮土细菌群落结构特征 …… 南镇武, 刘柱, 代红翠, 张磊, 王娜, 徐杰, 刘开昌, 孟维伟, 王旭清(4977)
稻田土壤光合细菌群落对镉污染的响应 …… 罗路云, 金德才, 王殿东, 陈昂, 张德咏, 曾军, 匡炜, 张卓, 刘勇(4988)
铁尾矿芦苇根际微生物和根内生菌群落分布及其限制性因子解析 …… 曹曼曼, 王飞, 周北海, 陈辉伦, 袁蓉芳(4998)
有机无机氮配施对不同程度盐渍土硝化和反硝化作用的影响 …… 周慧, 史海滨, 张文聪, 王维刚, 苏永德, 闫妍(5010)
水稻产量、稻田 CH_4 和 N_2O 排放对长期大气 CO_2 浓度升高的响应 … 于海洋, 宋开付, 黄琼, 王天宇, 张广斌, 马静, 朱春梧, 徐华(5021)
原料和热解温度对生物炭中可溶性有机质的影响 …… 闫代红, 马亚培, 宋凯悦, 马红亮, 高人, 尹云锋(5030)
中国 84 个主要城市大气热岛效应的时空变化特征及影响因子 …… 李宇, 周德成, 闫章美(5037)
室内建筑装饰装修材料气味物质及其释放研究进展 …… 张万众, 张彭义(5046)
《环境科学》征订启事(4814) 《环境科学》征稿简则(4871) 信息(4907, 5009, 5029)

Eco-Environmental Knowledge Web

环 境 科 学
Environmental Science

第42卷第10期 2021年10月
Vol.42,No.10 Oct.,2021

基于 eDNA 技术的渭河浮游动物多样性及关键种生态位特征

梁东[1,2], 夏军[1,2,3*], 宋进喜[1,2], 常剑波[3], 吴琼[1,2], 程丹东[1,2], 张怡晅[1,2], 孔飞鹤[1,2], 任源鑫[1,2]

(1. 西北大学城市与环境学院, 陕西省地表系统与环境承载力重点实验室, 西安 710127; 2. 西北大学秦岭研究院, 西安 710127; 3. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072)

摘要: 环境 DNA(eDNA)技术作为水生态系统生物多样性监测的新手段,能够从微观角度对生物群落结构特征进行分析. 基于渭河干流 eDNA 浮游动物 OTUs 分类信息数据及水环境参数,采用多样性指数、非度量多维尺度分析、聚类分析和关联网络分析等方法,探究了浮游动物的多样性和群落结构变化特征,揭示了关键种的生态位分化及其环境适应性. 结果表明,浮游动物群落在物种组成、丰度、多样性和空间异质性方面均存在显著差异($P<0.01$). Chao1 指数、ACE 指数、Shannon 指数和 Simpson 指数的均值分别为 22.25、22.38、2.32 和 0.68,下游生物多样性明显高于上游. 群落中的关键种与其他物种间连接度较高,具有高节点度、中心性和模块化特征. 关键种(类)的 OTUs 生态位宽度 B_i 变化范围为 0.38 ~ 0.80,中生态位种类占全部关键种(类)的 63%,生态位重叠程度总体较高. 水环境要素与浮游动物群落结构和生态位变化密切相关,其中总氮和水温是其主要限制因子,对浮游动物群落结构变化具有重要影响.

关键词:环境 DNA(eDNA); 渭河; 生态位; 关键种; 空间异质性

中图分类号: X171 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2021)10-4708-09 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.202101098

Diversity of Zooplankton and Niche Characteristics of Keystone Species in the Weihe River Based on eDNA

LIANG Dong[1,2], XIA Jun[1,2,3*], SONG Jin-xi[1,2], CHANG Jian-bo[3], WU Qiong[1,2], CHENG Dan-dong[1,2], ZHANG Yi-xuan[1,2], KONG Fei-he[1,2], REN Yuan-xin[1,2]

(1. Shaanxi Key Laboratory of Earth Surface System and Environmental Carrying Capacity, College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710127, China; 2. Institute of Qinling Mountains, Northwest University, Xi'an 710127, China; 3. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, School of Water Resources and Hydropower Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Environmental DNA(eDNA), a new tool for monitoring the biodiversity of aquatic ecosystems, is able to analyze characteristics of biodiversity from a microscopic perspective. Based on eDNA data collected from the Weihe River, diversity indexes, non-metric multidimensional scaling, cluster analysis, and correlation network analysis were employed to explore the diversity and community structure of zooplankton focusing on the niche differentiation of keystone species and environmental adaptability. The eDNA approach identified three types of zooplankton including Rotifera, Cladocera, and Copepoda, among which the dominant species was *Brachionus calyciflorus*. The zooplankton community shows significant differences in species composition, abundance, diversity and spatial distribution characteristics($P<0.01$). The average values of the Chao1 index, ACE index, Shannon index, and Simpson index were 22.25, 22.38, 2.32, and 0.68, respectively. The downstream biodiversity is significantly higher than in the upstream area. Non-metric multidimensional scale analysis and hierarchical cluster analysis further showed that the zooplankton community structure shows distinct regional differences. The keystone species in the community have a high degree of connection with other species, with a high node degree, centrality, and modularity. The niche breadth(B_i) of the operational taxonomic units(OTUs) of the keystone species varied from 0.38 to 0.80. The medium niche species accounted for 63% of all keystone species. The average niche overlap index(Q_{ik}) was 0.72, and the degree of overlap was generally high. RDA analysis further identified that water environmental variables were closely related to changes in the zooplankton community structure and niche differentiation. For example, total nitrogen and water temperature were the main limiting factors, which play important roles in shaping the zooplankton community structure.

Key words: environmental DNA(eDNA); Weihe River; niche; keystone species; spatial heterogeneity

浮游动物是水生态系统的重要组成部分,在整个营养系统中转移能量和营养物质,对水生态系统的物质循环、能量流动、信息传递和稳定性等方面起着重要作用[1]. 浮游动物对环境变化以及有毒物质极为敏感,也是衡量水生态健康状况的重要指标[2]. 物种间的相互作用是维持水生态系统稳定的重要因素,其中关键物种会对其他物种的丰富度和系统的动态变化产生强烈影响,并对维持生物多样性及其结构、功能和稳定性起关键作用[3]. 生态位的概念最初是由动物学家约瑟夫·格林内尔提出的,他强调了栖息地和食物在定义动物生态位中的作用[4]. 生态位能够反映种群在时间和空间上所占据的位置、种群分布的交错程度、潜在竞争关系以及对环境资源的利用情况,是分析和评价群落结构和功能、种间关系、群落动态演替和种群进化等方

收稿日期: 2021-01-12; **修订日期**: 2021-04-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(51679200);陕西省重点研发计划项目(ZDLSF05-02)

作者简介: 梁东(1990 ~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为生态水文学, E-mail: Liangdong@stumail.nwu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: xiaj@igsnrr.ac.cn

面的重要手段[5]. 现阶段,国内外对于生态位的研究侧重于分析生物优势种生态位分化、群落演替过程、生境适应性以及进化水平上物种的生态位动态研究[6]. Dorey 等[7]的研究分析了热带小岛蜂的生态位保守性对生物多样性的重要驱动作用. Fu 等[8]通过研究植物群落演替过程中物种的生态位动态变化,揭示了竞争/互利共生与物种生态位之间的关系,以及演替过程中位移/共存与物种生态位之间的关系. 但是,缺乏通过分子方法对生物多样性及生态位变化特征的研究.

目前,对于物种的识别主要以观察生物的形态特征为主,但传统方法在调查过程中会对生态系统产生干扰,部分物种存在样本采集困难、耗时费力和分辨度低等局限[9]. 如何快速、准确和有效地揭示生物的多样性仍面临着巨大的挑战[10]. 近年来,随着高通量测序技术的快速发展,生物信息学处理方法和软件的不断更新,推动了分子技术在生物群落监测方面的研究,从而使得物种识别方法开始从形态分类向分子生物方法转变[11]. 环境 DNA(environmental DNA, eDNA)是指从环境(如水、土壤或空气)中提取的所有 DNA 集合,包括环境微生物和生物体脱落的细胞,以及在生物死亡后因细胞破裂而释放的细胞外 DNA[12]. eDNA 技术因通量高、易发现新物种,在探究生物群落组成和检测物种多样性方面会更加准确、全面和快捷,适合大规模生物多样性分析[13]. 该方法能够克服传统方法在调查生物多样性时存在的局限,表现出更好的检测能力和成本效益[14,15].

渭河作为黄河流域生态保护战略的重要组成部分,其水生态安全问题直接关系到黄河流域的高质量发展. 但现有研究难以深入而全面地反映该流域的水生态系统的现状[16]. 因此,本研究利用 eDNA 方法分析渭河浮游动物的组成和多样性特征,探究其空间分布的差异性和群落内部物种间的相互关系. 此外,基于 OTU 数据从生态位宽度和生态位重叠两个角度揭示关键种(类)的生态位变化特征,解析环境变化对生物群落的影响机制,以期为河流生态系统修复及监测管理提供理论指导和科学支撑.

1　材料与方法

1.1　研究区概况

渭河(北纬 33°42′ ~ 37°20′,东经 106°18′ ~ 110°37′)是黄河的最大支流,发源于甘肃省渭源县鸟鼠山(图 1). 渭河全长共 818 km,流域内地貌类型复杂多样,主要流经黄土高原、天水盆地、宝鸡峡谷以及关中平原,地势西高东低[17]. 气候类型为大陆性季风气候,属于暖温带半湿润半干旱的气候带,年平均气温在 7.8 ~ 13.5℃之间,降雨量在 350 ~ 700 mm 之间[18].

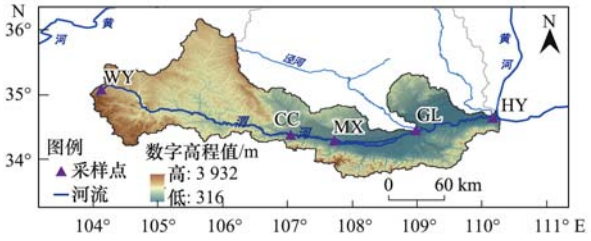


图 1　渭河采样点示意

Fig. 1　Location of the monitoring stations in the Weihe River

1.2　样品采集及处理

本研究通过野外实地考察,并参照国家水文水质监测站的布置,设置了 5 个采样断面(图 1). 采样工作于 2018 年 4 月进行,采样地点覆盖渭河的上,中,下游,分别为渭源(WY)、陈仓(CC)、眉县(MX)、高陵(GL)和华阴(HY). 在每个采样点的表层,中层和底层采集 2 L 混合水样,共收集 15 个样品,用于 DNA 提取. 每个 DNA 样品使用 0.45 μm 滤膜过滤水样,然后将富集 DNA 的滤膜装入无菌试管中,于 -80℃冰箱中保存[19].

1.3　环境因子监测

总氮(TN)和总磷(TP)指标根据文献[20]测定. 流速、水深、河宽、pH 值、溶解氧和水温等指标经现场测量获得.

1.4　eDNA 数据分析

利用线粒体细胞色素 C 氧化酶 I(COI)基因,构建测试样品的测序文库. 根据 QIIME 软件中≥97%的相似度,对获得的高质量序列进行 OTU 聚类,并通过 BLAST 方法将获得的代表序列与数据库进行比较,获得 OTU 的分类信息. 将 COI 基因序列与 NCBI GenBank 参考数据库比对,进行物种的注释. 后续分析是基于数据集中获得的简化 OTU 列表进行的. 在生物多样性分析中,PCA 分析(principal component analysis)、冗余分析(RDA)、聚类分析和非度量多维尺度(NMDS)分析均由 R 软件完成. 使用 Mothur 软件对门水平的各个分类单元在样本之间的序列量差异进行比较检验,并计算所有物种之间的 Spearman 等级相关系数,对其构建关联网络. 采用物种的丰度、Chao1 丰富度估计指数(S_{Chao1})[21]、ACE 丰富度估计指数(S_{ACE})[22]、Shannon 多样性指数(H)[23]、Simpson 多样性指数(D)[24]、Levins 生态位宽度指数(B_i)[25]和 Pianka 生态位重叠指数(Q_{ik})[26]对浮游动物多样性进行分析.

$$S_{\text{Chao1}} = S_{\text{obs}} + \frac{n_1(n_1 - 1)}{2(n_2 + 1)} \tag{1}$$

式中，S_{Chao1}表示估计的 OTU 数，S_{obs}表示实际观测到的 OTU 数，n_1 表示只含有一条序列的 OTU 数目，n_2 表示只含有两条序列的 OTU 数目.

$$S_{ACE} = \begin{cases} S_{abund} + \dfrac{S_{rare}}{C_{ACE}} + \dfrac{n_i}{C_{ACE}} & (\hat{\gamma}^2_{ACE} < 0.80) \\ S_{abund} + \dfrac{S_{rare}}{C_{ACE}} + \dfrac{n_i}{C_{ACE}} & (\hat{\gamma}^2_{ACE} \geqslant 0.80) \end{cases} \quad (2)$$

式中：$C_{ACE} = \dfrac{n_i}{N_{rare}}$，$N_{rare} = \sum_{i=1}^{abund} i n_i$；

$$\hat{\gamma}^2_{ACE} = \max\left[\frac{S_{rare}\sum_{i=1}^{abund} i(i-1)n_i}{C_{ACE}N_{rare}(N_{rare}-1)} - 1, \quad 0\right];$$

$$\hat{\gamma}^2_{ACE} = \max\left[\hat{\gamma}^2_{ACE}\left\{1 + \frac{N_{rare}(1-C_{ACE})\sum_{i=1}^{abund} i(i-1)n_i}{N_{rare}(N_{rare}-C_{ACE})}\right\}, \quad 0\right]$$

式中，n_i 表示含有 i 条序列的 OTU 数目，S_{rare}表示含有“abund”条序列或者少于“abund”的 OTU 数目，S_{abund}表示多于“abund”条序列的 OTU 数目.

$$H = -\sum_{i=1}^{s} p_i \log_2 p_i \quad (3)$$

式中，s 为 OTU 的数量，p_i 是 OTU i 在群落中的占比.

$$D = 1 - \sum p_i^2 \quad (4)$$

$$B_i = 1 \Big/ r\sum_{j=1}^{r} P_{ij}^2 \quad (5)$$

式中，B_i 为生态位宽度，P_{ij}为种 i 在第 j 个资源状态下的 OTU 数占该种所有 OTU 数比例，r 为资源总数，B_i 值越大，生态位宽度就越大.

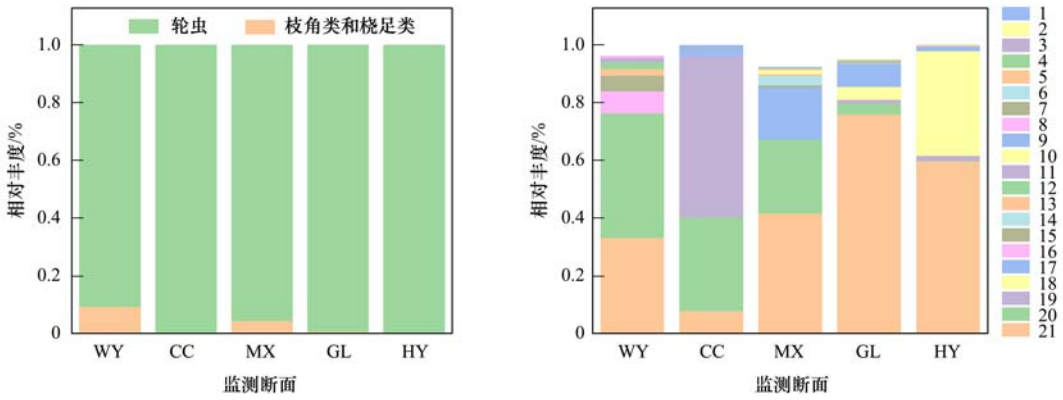
$$O_{ik} = \sum_{j=1}^{r} P_{ij}P_{kj} \Big/ \sqrt{\sum_{j=1}^{r} P_{ij}^2 \sum_{j=1}^{r} P_{kj}^2} \quad (6)$$

式中，O_{ik}为生态位重叠指数，P_{ij}和 P_{kj}为种 i 和种 k 在第 j 个资源状态下的 OTU 数占其所有 OTU 数比例，r 为资源总数.

2 结果与分析

2.1 浮游动物的多样性特征

通过对获得的 OTU 序列进行物种注释发现，浮游动物主要鉴定为轮虫、枝角类和桡足类，其中轮虫的 OTUs 占比最高（图 2）. 臂尾轮虫属（*Brachionus*）在下游地区的丰度较高，而疣毛轮虫属（*Synchaeta*）则在上游地区占有较大优势. 丰度排名前 3 位的优势物种分别为萼花臂尾轮虫（*Brachionus calyciflorus*）、异尾轮虫（*Trichocerca* sp.）和颤动疣毛轮虫（*Synchaeta tremula*）. 生物多样性分析表明，Chao1 和 ACE 指数从上游到下游逐渐增大，其中 Chao1 指数的变化范围为 6.33 ~ 39.67，ACE 指数的变化范围为 6.59 ~ 39.67，两种指数均表明群落的丰富度在逐渐增高. Shannon 和 Simpson 指数也显示下游明显高于上游，其中 Shannon 指数在 1.73 ~ 2.80 之间，Simpson 指数在 0.61 ~ 0.82 之间，下游的群落多样性更高（图 3）.



1. 长剑水蚤属（*Diacyclops*）；2 剑水蚤属（*Cyclops*）；3. 龟纹轮属（*Anuraeopsis*）；4. 蒲氏轮虫属（*Beauchampia*）；5. 腔轮属（*Lecane*）；6. 轮虫属（*Rotaria*）；7. 华哲水蚤属（*Sinocalanus*）；8. 扁甲轮属（*Plationus*）；9 须足轮属（*Euchlanis*）；10. 无柄轮虫属（*Ascomorpha*）；11. 纺锤水蚤属（*Acartia*）；12. 哲水蚤属（*Bestiolina*）；13. 晶囊轮虫属（*Asplanchna*）；14. 拟剑水蚤属（*Paracyclops*）；15. 真胖水蚤属（*Euchirella*）；16. 旋轮属（*philodina*）；17. 龟甲轮属（*Keratella*）；18. 多肢轮属（*Polyarthra*）；19. 异尾轮属（*Trichocerca*）；20. 疣毛轮属（*Synchaeta*）；21. 臂尾轮属（*Brachionus*）

图 2 浮游动物群落组成和丰度分布

Fig. 2 Community composition and abundance distribution of zooplankton

2.2 浮游动物群落结构的空间异质性

浮游动物的群落结构呈现出明显的区域差异. 轮虫的 OTUs 丰度表现出从上游到下游逐渐增加的趋势，而节肢动物（枝角类和桡足类）则呈现出从上游到下游逐渐递减的特征（图 4）. NMDS 分析结果显示[图 5(a)]，上下游群落间的空间分布存在明显的差异性（$P < 0.05$）. 层次聚类结果显示，下游的 HY 和 GL 聚为一类，而上

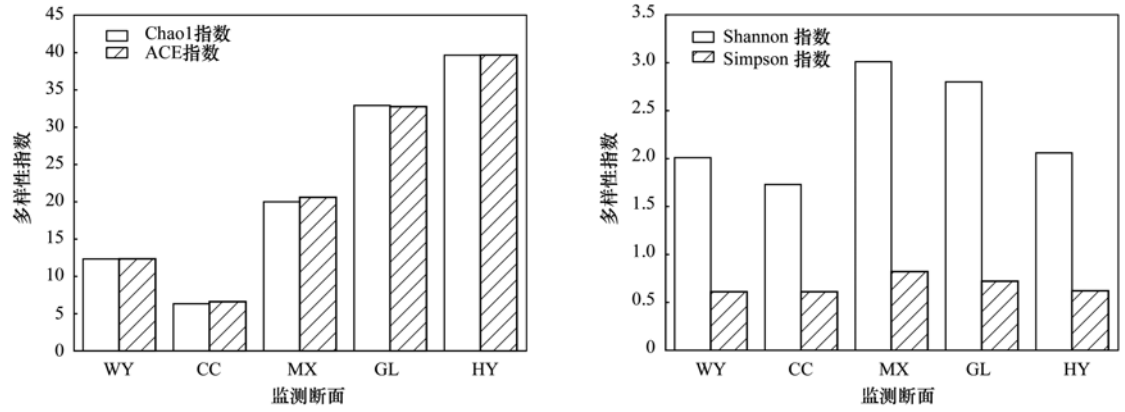


图 3　浮游动物群落的多样性指数

Fig. 3　Diversity index of the zooplankton community

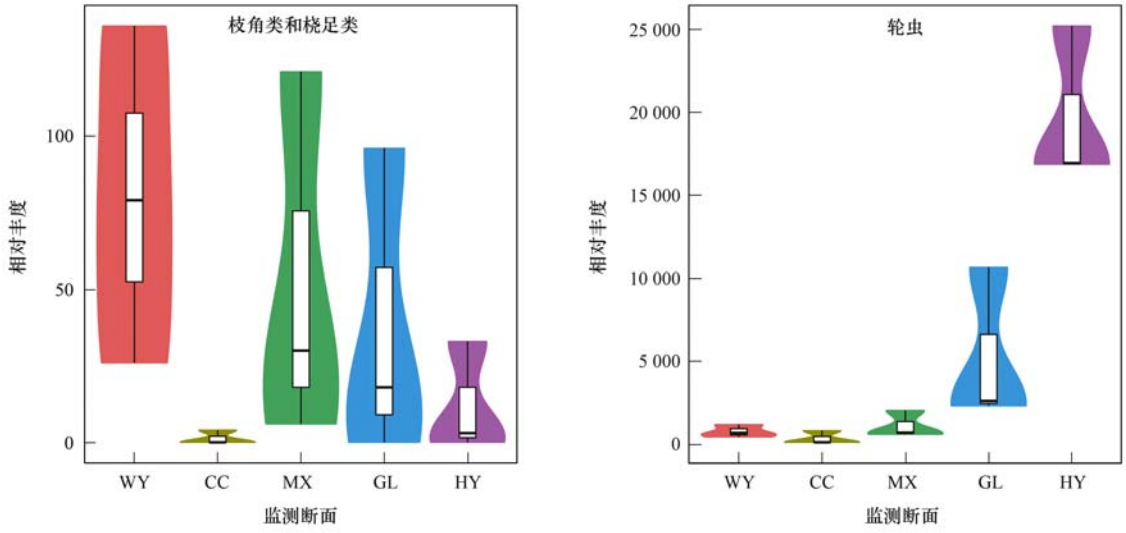


图 4　浮游动物丰度的空间差异

Fig. 4　Spatial differences in the abundance of zooplankton

中游的 WY 和 MX、CC 各自聚为一类[图 5(b)]. 说明上下游不同河段的浮游动物群落在物种组成、相对丰度及多样性方面存在空间异质性. 此外,也反映出浮游动物存在距离衰减效应,群落结构随着地理距离、海拔距离和环境异质性的增大,相似性逐渐降低.

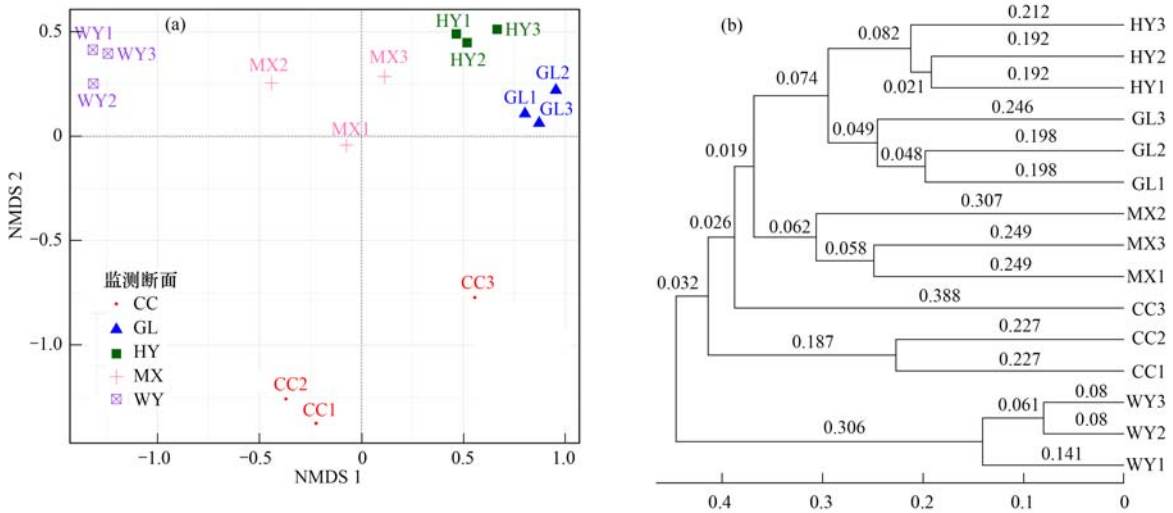
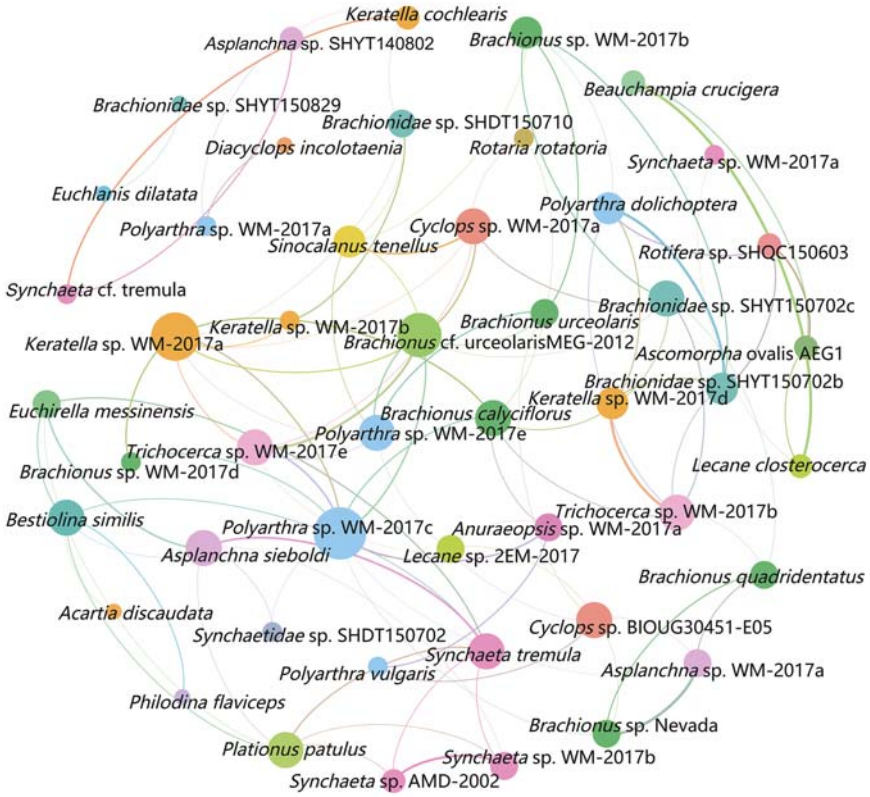


图 5　基于浮游动物 OTUs 的 NMDS 分析和样本层次聚类分析

Fig. 5　Cluster analysis of the zooplankton community structure

2.3 群落内物种间的共现模式

分子生态网络分析显示,群落内物种间的网络节点数和相互连接度较高,网络结构表现出复杂化特点(图6). 群落中丰度高的优势种,如臂尾轮虫(*Brachionus*)、多肢轮虫(*Polyarthra* sp.)以及异尾轮虫(*Trichocereca* sp.)之间连接度较高,具有高节点度、高紧密中心性,且呈现模块化特征. 同时优势种与群落内其它物种间存在着直接或间接的联系,在群落中起着至关重要的作用. 此外,剑水蚤(*Cyclops* sp.)、扁甲轮虫(*Plationus patulus*)、龟甲轮虫(*Keratella* sp.)和细巧华哲水蚤(*Sinocalanus_tenellus*)等稀有物种(相对丰度低于1%)在群落中也有较高的连接度. 这些高连接度的优势种和稀有物种共同组成群落的关键种.



节点大小代表浮游动物间连接数量的不同,连接线代表物种间的关联程度

图6 浮游动物群落的网络结构

Fig. 6 Network structure of the zooplankton community

2.4 浮游动物关键种的生态位宽度和生态位重叠

生态位宽度一般分为广生态位(B_i >0.60)、中生态位(B_i为0.30~0.60)和窄生态位(B_i <0.30)这3种类型. 综合浮游动物OTUs的丰度和连接度,对关键种进行生态位分析. 生态位宽度值(B_i)计算结果显示(表1),渭河浮游动物关键种的生态位宽度值(B_i)变化范围为0.38~0.80,主要为广生态位和中生态位种(类)群. 广生态位的物种有疣毛轮虫(0.80)、颤动疣毛轮虫(0.80)和萼花臂尾轮虫(0.61). 中生态位物种包括龟甲轮虫(0.56)、异尾轮虫(0.40)、剑水蚤(0.40)、扁甲轮虫(0.40)和多肢轮虫(0.38),中生态位种类占全部关键种(类)的

表1 浮游动物关键种(类)生态位宽度值和生态位重叠指数[1)]

Table 1 Niche breadth and the niche overlap index of the keystone species

序号	物种(Species)	B_i	Q_{ik}							
			1	2	3	4	5	6	7	8
1	萼花臂尾轮虫(*Brachionus calyciflorus*)	0.61	1							
2	多肢轮虫(*Polyarthra* sp.)	0.38	0.94	1						
3	疣毛轮虫(*Synchaeta* sp.)	0.80	0.80	0.69	1					
4	颤动疣毛轮虫(*Synchaeta tremula*)	0.80	0.85	0.69	0.75	1				
5	异尾轮虫(*Trichocerca* sp.)	0.40	0.90	0.98	0.71	0.71	1			
6	龟甲轮虫(*Keratella* sp.)	0.56	0.94	0.92	0.83	0.83	0.94	1		
7	剑水蚤(*Cyclops* sp.)	0.40	0.90	0.98	0.71	0.71	1.00	0.94	1	
8	扁甲轮虫(*Plationus patulus*)	0.40	0.70	0.59	0.35	0.71	0.50	0.47	0.50	1

1)B_i表示生态位宽度指数; O_{ik}表示生态位重叠指数

63%. 渭河浮游动物关键种之间的生态位重叠程度总体较高，有 23 对关键种之间的 Q_{ik} 大于 0.60，平均值为 0.72，高度重叠者占比高达 72%，且部分物种间生态位重叠指数达到了 0.90 以上.

2.5　浮游动物群落与环境因子的关系

浮游动物群落关键种 OTUs 数据与环境因子间的冗余分析结果显示（图 7），浮游动物群落结构与环境因素有明显的关系，且存在空间异质性特征. RDA 排序图前两轴累计解释率为 58.81%（P = 0.001），总氮、水温、总磷、河宽、pH 值和水深等环境因素之间呈正相关，且对下游的关键物种的影响较大，其中总氮（R^2 = 0.896 7，P = 0.001）和水温（R^2 = 0.888 8，P = 0.001）是其主要限制因子. 溶解氧和流速对上游河段浮游动物群落影响更大. 以上结果表明，环境因子与浮游动物关键种存在显著的相关性（P < 0.01），冗余分析能够反映浮游动物种群及生态位变化与环境因子间的基本关系.

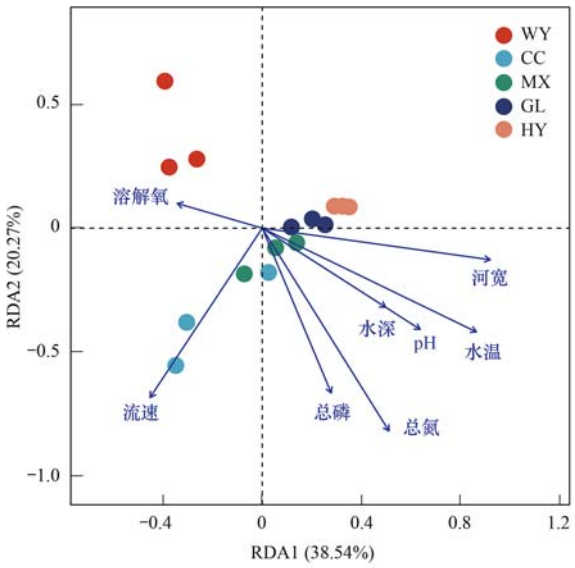


图 7　浮游动物群落关键种与环境因子的 RDA 排序

Fig. 7　Redundancy analysis of the zooplankton community and significant environmental variables

3　讨论

3.1　浮游动物群落的多样性及变化特征

渭河浮游动物群落的种类组成以轮虫类为主，个体较大的枝角类和桡足类丰度相对较低，与该地区已有的传统方法调查结果一致[27]. 在物种数量鉴定方面，eDNA 技术通过较少的断面监测即获得了较多的物种信息，显示出分子方法在物种鉴定方面具有较高的物种分辨率和检测效率[28]. 不同区域间物种组成的差异可能是受到浮游动物的繁殖、发育特征以及环境适用性等因素的影响[29]. 水体理化环境和水文条件的变化，对生物群落的多样性和空间分布起着重要作用. 上游河段流速快、温度低，不利于浮游生物的生长发育，导致上游生物多样性指数偏低[30]. 下游河段有泾河和北洛河两大支流汇入，营养物质丰富，且该区域海拔较低，水体流速较缓，水温较高，适宜浮游动物的生长繁殖[31]. 此外，浮游动物扩散能力弱，存在一定的距离衰减模式. 中性理论认为，物种的迁移、扩散等行为在塑造生物群落方面发挥着重要作用[32].

3.2　浮游动物群落的分子生态网络分析

网络分析揭示了群落内轮虫与枝角类和桡足类之间存在的复杂关联. 有研究表明，节肢动物（枝角类和桡足类）和轮虫类之间可能存在资源利用性竞争，机械干涉性竞争和化学干涉性竞争[33]. 群落中优势类群间联系密切且存在模块化现象，说明优势种在群落中占据相似的生态位，并具有类似的生态功能[34]. 群落中稀有类群与优势类群共存，共同在群落功能和稳定性方面发挥着重要驱动作用. 此外，关键种在维持食物网稳定性方面也发挥着不可替代的作用，例如，通过密切联系群落的其他物种，维持捕食者的密度来限制其他被捕食者的密度，控制群落的结构和能量流动[35]. 臂尾轮虫等关键种（类）会通过影响其他物种的丰度或使生态位发生改变的方式对生态系统的动态产生强烈影响[36]. 此外，食物密度、环境耐受性、移动速度以及温度等水环境变化也会对种群关系产生影响[37].

3.3　浮游动物关键种的生态位分化及环境适应性

生态位是生物种（类）对环境适应的结果，能够反映其应对环境变化的策略，进而决定物种的分布格局[38]. 广生态位物种对于环境的适应能力和资源的利用能力最强，其次为中生态位的生物类群，而窄生态位的物种适应性最低，对生境的变化最为敏感[39]. 渭河浮游动物关键种（类）主要为广生态位类型，且生态位重叠指数较高. 生态位重叠指数能够充分反映浮游动物关键物种（类）间对资源利用的相互关系[40]. 已有研究表明，当生态位重叠指数 > 0.6 时，群落内物种在同一生境内对空间和食物资源利用的相似性也较高，并对水环境的变化表现出较好的生态适应性[41]. 生态位重叠度较高的关键种群，在资源足够丰富的情况下不会引发竞争，但当资源匮乏时，会导致竞争加剧. 白洋淀浮游动物的调查结果也显示，优势种间的生态位重叠平均值为 0.679，高度重叠者的占比高达 61.90%[42]. 此外，重叠度较高的关键种在竞争中会通过生态位分化降低物种间的竞争，从而促进共存和维持整个系统的生物多样性[43]. 但是，部分生态位宽度较大的物种，其生态学特征和对资源的利用也并非完全一致，生态位宽度

较大的物种间也可能会出现较低幅度的生态位重叠[44].

物种的群落结构和生态位均与环境变化密切相关,物种对资源的利用及对环境的适应也会受到环境变化的影响[45]. 渭河水体中的总氮含量高,已超过Ⅴ类水标准,说明受到有机物的严重污染. 冗余分析结果显示,导致渭河生物多样性产生变动的最主要水质因素是氮的含量. 相关研究表明,浮游动物群落与水体营养物质的变化密切相关,营养物质不仅能通过影响浮游植物生长来影响浮游动物,还可通过渗透和离子调节机制影响浮游动物生长繁殖[46]. 渭河的河道形态复杂多样,海拔落差大,加上支流汇入带来的营养物质,导致生活在该区域的浮游动物组成和分布呈现多样化[47]. 渭河宝鸡峡大坝改变了原有河流的水文、水动力学条件,也改变了上下游间的栖息地环境,继而对浮游动物的基因、物种和分布模式产生影响[48]. 下游河段出现的浮游动物以轮虫类为主,其中臂尾轮虫、异尾轮虫、多肢轮虫和龟甲轮虫等富营养化指示种与关中城市群区域所产生的污水密切相关[49]. 此外,浮游动物群落的构建也会受到随机生态漂变和生态位分化共同的作用[50]. 总体而言,浮游动物多样性和生态位的异质性反映了群落和环境间的响应关系.

4 结论

(1)浮游动物多样性呈现出从上游到下游逐渐增高的特征. 群落结构在各监测断面间具有显著的区域差异($P<0.05$),并存在距离衰减效应.

(2)浮游动物分子生态网络具有高节点度、高紧密中心性,且呈现模块化特征. 优势种和稀有物种共同在群落中发挥重要作用.

(3)渭河浮游动物关键种的生态位宽度值变化范围在 0.38 ~ 0.80 之间,主要为广生态位和中生态位种(类)群. 生态位重叠程度总体较高,其中高度重叠者占比高达 72%,且部分物种间生态位重叠指数达到了 0.90 以上.

(4)浮游动物群落结构主要与水体物理特征(水温、河宽、流速和水深)以及氮磷元素密切相关($P<0.01$). 总氮($R^2=0.8967$, $P=0.001$)和水温($R^2=0.8888$, $P=0.001$)是其主要限制因子,对浮游动物的群落结构的变化具有重要影响.

参考文献:

[1] Ismail A H, Lim C C, Omar W M W. Evaluation of spatial and temporal variations in zooplankton community structure with reference to water quality in Teluk Bahang Reservoir, Malaysia [J]. Tropical Ecology, 2019, **60**(2): 186-198.

[2] Isibor P O, Imoobe T O T, Dedeke G A, *et al*. Health risk indices and zooplankton-based assessment of a tropical rainforest river contaminated with iron, lead, cadmium, and chromium [J]. Scientific Reports, 2020, **10**(1), doi: 10.1038/s41598-020-72526-1.

[3] Krztoń W, Kosiba J, Pociecha A, *et al*. The effect of cyanobacterial blooms on bio-and functional diversity of zooplankton communities [J]. Biodiversity and Conservation, 2019, **28**(7): 1815-1835.

[4] Grinnell J. Field tests of theories concerning distributional control [J]. The American Naturalist, 1917, **51**(602): 115-128.

[5] Barton P S, Westgate M J, Foster C N, *et al*. Using ecological niche theory to avoid uninformative biodiversity surrogates [J]. Ecological Indicators, 2020, **108**, doi: 10.1016/j.ecolind.2019.105692.

[6] Feng K, Wang S, Wei Z Y, *et al*. Niche width of above-and below-ground organisms varied in predicting biodiversity profiling along a latitudinal gradient [J]. Molecular Ecology, 2020, **29**(10): 1890-1902.

[7] Dorey J B, Groom S V C, Freedman E H, *et al*. Radiation of tropical island bees and the role of phylogenetic niche conservatism as an important driver of biodiversity [J]. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 2020, **287**(1925), doi: 10.1098/rspb.2020.0045.

[8] Fu W G, Wang F K, Yin Q L, *et al*. Niche dynamics of species in succession process in the wetland of Yangtze Rivers Lower Reach, China [J]. Plant Ecology and Evolution, 2015, **148**(1): 43-51.

[9] Yang J H, Zhang X W. eDNA metabarcoding in zooplankton improves the ecological status assessment of aquatic ecosystems [J]. Environment International, 2020, **134**, doi: 10.1016/j.envint.2019.105230.

[10] Furlan E M, Gleeson D, Wisniewski C, *et al*. eDNA surveys to detect species at very low densities: a case study of European carp eradication in Tasmania, Australia [J]. Journal of Applied Ecology, 2019, **56**(11): 2505-2517.

[11] 张莉, 张远, 林佳宁, 等. 基于多个扩增子的 DNA metabarcoding 技术探究黄海微型真核浮游植物多样性[J]. 环境科学, 2019, **40**(9): 4052-4060.
Zhang L, Zhang Y, Lin J N, *et al*. Community diversity of eukaryotic nano-phytoplankton in Yellow Sea using DNA metabarcoding technology based on multiple amplicons [J]. Environmental Science, 2019, **40**(9): 4052-4060.

[12] Taberlet P, Coissac E, Hajibabaei M, *et al*. Environmental DNA [J]. Molecular Ecology, 2012, **21**(8): 1789-1793.

[13] Valentini A, Taberlet P, Miaud C, *et al*. Next-generation monitoring of aquatic biodiversity using environmental DNA metabarcoding [J]. Molecular Ecology, 2016, **25**(4): 929-942.

[14] 徐念, 常剑波. 长江中下游干流环境 DNA 样本鱼类物种检测的初步研究[J]. 水生态学杂志, 2016, **37**(5): 49-55.
Xu N, Chang J B. Preliminary study on fish species detection in the middle and lower Yangtze River using environmental DNA [J]. Journal of Hydroecology, 2016, **37**(5): 49-55.

[15] Bakker J, Wangensteen O S, Baillie C, *et al*. Biodiversity assessment of tropical shelf eukaryotic communities via pelagic eDNA metabarcoding [J]. Ecology and Evolution, 2019, **9**(24): 14341-14355.

[16] 贺玉晓, 李珂, 任玉芬, 等. 春季北京市河流大型底栖动物群落结构特征及影响因子分析[J]. 环境科学, 2020, **41**(6): 2951-2962.
He Y X, Li K, Ren Y F, *et al*. Characteristics of macrobenthos

community structure and their relationships with environmental factors in rivers of Beijing in spring[J]. Environmental Science, 2020, **41**(6): 2951-2962.

[17] 张妍, 毕直磊, 张鑫, 等. 土地利用类型对渭河流域关中段地表水硝酸盐污染的影响[J]. 生态学报, 2019, **39**(12): 4319-4327.
Zhang Y, Bi Z L, Zhang X, *et al*. Effects of land-use types on nitrate pollution of surface water in Guanzhong area in the Weihe River basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, **39**(12): 4319-4327.

[18] Song J X, Yang X G, Zhang J L, *et al*. Assessing the variability of heavy metal concentrations in liquid-solid two-phase and related environmental risks in the Weihe River of Shaanxi Province, China [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2015, **12**(7): 8243-8262.

[19] 陈治, 宋娜, 源利文, 等. 舟山近海水样环境 DNA 获取方法的建立[J]. 水生生物学报, 2020, **44**(1): 50-58.
Chen Z, Song N, Minamoto T, *et al*. The eDNA collection method of Zhoushan coastal waters [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2020, **44**(1): 50-58.

[20] 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.

[21] Chao A. Nonparametric estimation of the number of classes in a population [J]. Scandinavian Journal of Statistics, 1984, **11**(4): 265-270.

[22] Chao A N, Ma M C, Yang M C K. Stopping rules and estimation for recapture debugging with unequal failure rates [J]. Biometrika, 1993, **80**(1): 193-201.

[23] Shannon C E. A mathematical theory of communication[J]. The Bell System Technical Journal, 1948, **27**(3): 379-423.

[24] Simpson E H. Measurement of diversity[J]. Nature, 1949, **163**(4148): 688.

[25] Levins R. Evolution in changing environments: some theoretical explorations[M]. Princeton: Princeton University Press, 1968.

[26] Pianka E R. The structure of lizard communities[J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1973, **4**: 53-74.

[27] 王硕, 杨涛, 李小平, 等. 渭河流域浮游动物群落结构及其水质评价[J]. 水生生物学报, 2019, **43**(6): 1333-1345.
Wang S, Yang T, Li X P, *et al*. Zooplankton community structure and the water quality in the Wei River Basin[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2019, **43**(6): 1333-1345.

[28] 王靖淇, 王书平, 张远, 等. 高通量测序技术研究辽河真核浮游藻类的群落结构特征[J]. 环境科学, 2017, **38**(4): 1403-1413.
Wang J Q, Wang S P, Zhang Y, *et al*. Community structure characteristics of eukaryotic planktonic algae in Liaohe River through high-throughput sequencing[J]. Environmental Science, 2017, **38**(4): 1403-1413.

[29] Gabaldón C, Devetter M, Hejzlar J, *et al*. Seasonal strengths of the abiotic and biotic drivers of a zooplankton community[J]. Freshwater Biology, 2019, **64**(7): 1326-1341.

[30] Zhou J, Qin B Q, Han X X. The synergetic effects of turbulence and turbidity on the zooplankton community structure in large, shallow Lake Taihu[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, **25**(2): 1168-1175.

[31] Portinho J L, Perbiche-Neves G, Nogueira M G. Zooplankton community and tributary effects in free-flowing section downstream a large tropical reservoir[J]. International Review of Hydrobiology, 2016, **101**(1-2): 48-56.

[32] Chen W D, Ren K X, Isabwe A, *et al*. Stochastic processes shape microeukaryotic community assembly in a subtropical river across wet and dry seasons[J]. Microbiome, 2019, **7**(1), doi: 10.1186/s40168-019-0749-8.

[33] Carter J L, Schindler D E, Francis T B. Effects of climate change on zooplankton community interactions in an Alaskan lake [J]. Climate Change Responses, 2017, **4**(1), doi: 10.1186/s40665-017-0031-x.

[34] Dupont Y L, Olesen J M. Ecological modules and roles of species in heathland plant-insect flower visitor networks[J]. Journal of Animal Ecology, 2009, **78**(2): 346-453.

[35] Jordán F. Keystone species and food webs [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 2009, **364**(1524): 1733-1741.

[36] Yang S, Pan T, Wang X, *et al*. Dominant aquatic species and their hydrological niches in freshwater ecosystems in a developing city[J]. Marine and Freshwater Research, 2019, **70**(5): 615-624.

[37] Voutilainen A, Jurvelius J, Lilja J, *et al*. Associating spatial patterns of zooplankton abundance with water temperature, depth, planktivorous fish and chlorophyll [J]. Boreal Environment Research, 2016, **21**(1-2): 101-114.

[38] 侯朝伟, 孙西艳, 刘永亮, 等. 烟台近海浮游动物优势种空间生态位研究[J]. 生态学报, 2020, **40**(16): 5822-5833.
Hou C W, Sun X Y, Liu Y L, *et al*. Spatial niches of dominant zooplankton species in the Yantai offshore waters [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, **40**(16): 5822-5833.

[39] Richmond J Q, Ota H, Grismer L L, *et al*. Influence of niche breadth and position on the historical biogeography of seafaring scincid lizards[J]. Biological Journal of the Linnean Society, 2021, **132**(1): 74-92.

[40] Huang S Q, Zhou Q, Gu L C, *et al*. Modeling and simulation study of the stoichiometric niche space and niche overlap based on the copula method [J]. Environmental and Ecological Statistics, 2020, **27**(1): 115-149.

[41] 郑挺, 林元烧, 曹文清, 等. 北部湾北部生态系统结构与功能——浮游动物空间生态位及其分化[J]. 生态学报, 2014, **34**(13): 3635-3649.
Zheng T, Lin Y S, Cao W Q, *et al*. Ecosystem structure and function in northern Beibu Gulf: zooplankton spatial niche and its differentiation [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, **34**(13): 3635-3649.

[42] 付显婷, 杨薇, 赵彦伟, 等. 白洋淀浮游动物群落结构与水环境因子的关系[J]. 农业环境科学学报, 2020, **39**(6): 1271-1282.
Fu X T, Yang W, Zhao Y W, *et al*. Community structure of zooplankton and its relationship with water environmental factors in Baiyangdian Lake[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, **39**(6): 1271-1282.

[43] Chaloner T M, Gurr S J, Bebber D P. Geometry and evolution of the ecological niche in plant-associated microbes [J]. Nature Communications, 2020, **11**(1), doi: 10.1038/s41467-020-16778-5.

[44] Manlick P J, Pauli J N. Human disturbance increases trophic niche overlap in terrestrial carnivore communities [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2020, **117**(43): 26842-26848.

[45] 杨佳, 周健, 秦伯强, 等. 太湖梅梁湾浮游动物群落结构长期变化特征(1997～2017 年)[J]. 环境科学, 2020, **41**(3): 1246-1255.
Yang J, Zhou J, Qin B Q, *et al*. Long-term variation characteristics of zooplankton community structure in Meiliang Bay, Lake Taihu[J]. Environmental Science, 2020, **41**(3):

1246-1255.

[46] Işktn U, Filiz N, Cao Y, *et al*. Impact of nutrients, temperatures, and a heat wave on zooplankton community structure: an experimental approach[J]. Water, 2020, **12**, doi: 10.3390/w12123416.

[47] 孙胜浩, 陈娟, 王沛芳, 等. 澜沧江硅藻的地理分布模式与关键驱动因素[J]. 环境科学, 2020, **41**(12): 5458-5469.
Sun S H, Chen J, Wang P F, *et al*. Biogeographic distribution patterns of diatoms in Lancang River and their key Drivers[J]. Environmental Science, 2020, **41**(12): 5458-5469.

[48] de Souza C A, Vieira L C G, Legendre P, *et al*. Damming interacts with the flood pulse to alter zooplankton communities in an Amazonian river[J]. Freshwater Biology, 2019, **64**(5): 1040-1053.

[49] 杜彩丽, 杨丽, 赵诣, 等. 淀山湖浮游动物群落时空分布特征及其与环境因子的关系[J]. 环境科学, 2019, **40**(10): 4513-4522.
Du C L, Yang L, Zhao Y, *et al*. Temporal and spatial variation of zooplankton community structure and its relationship with environmental factors in Dianshan Lake, Shanghai [J]. Environmental Science, 2019, **40**(10): 4513-4522.

[50] Siqueira T, Saito V S, Bini L M, *et al*. Community size can affect the signals of ecological drift and niche selection on biodiversity[J]. Ecology, 2020, **101**(6), doi: 10.1002/ecy.3014.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 42 No. 10

Oct. 15, 2021

CONTENTS

Continuous $PM_{2.5}$ Composition Measurements for Source Apportionment During Air Pollution Events ····· CAI Fan-tao, SHANG Yue, DAI Wei, *et al.* (4575)

Orographic Influences on the Spatial Distribution of $PM_{2.5}$ on the Fen-Wei Plain ····· HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, SUN Cong-jian, *et al.* (4582)

Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in $PM_{2.5}$ Under Winter Haze Conditions in Central China: A Case Study of Huanggang, Hubei Province ····· LI Xing-yu, MAO Yao, CHEN Zhan-le, *et al.* (4593)

Concentration and Reactivity of Carbonyl Compounds in the Atmosphere of North China ····· HUANG Yu, CHEN Xi, WANG Ying-hong, *et al.* (4602)

Characteristics of O_3 Pollution and Key Precursors in Chengdu During Spring ····· HAN Li, CHEN Jun-hui, JIANG Tao, *et al.* (4611)

O_3 Source Characteristics of an Industrial Area in the Yangtze River Delta Based on Boundary Observations ····· HUANG Qing, HUANG Yin-zhi, ZHANG Shan, *et al.* (4621)

Characteristics and Source of VOCs During O_3 Pollution Between August to September, Langfang Development Zones ····· ZHANG Jing-qiao, WANG Hong-liang, FANG Xiao-yun, *et al.* (4632)

Coating-derived VOCs Emission Characteristics and Environmental Impacts from the Furniture Industry in Guangdong Province ····· ZENG Chun-ling, SHAO Xia, LIU Rui-yuan, *et al.* (4641)

Response of Air Quality to COVID-19 Lockdown in Xiamen Bay ····· XU Chao, WU Shui-ping, LIU Yi-jing, *et al.* (4650)

Similarities and Differences of Valley Winds in the Beijing Plain and Yanqing Areas and Its Impact on Pollution ····· WU Jin, LI Chen, MA Zhi-qiang, *et al.* (4660)

Characteristics of Atmospheric Particulate Matter Pollution and the Unique Wind and Underlying Surface Impact in the Twain-Hu Basin in Winter ····· ZHU Yan, ZHAO Tian-liang, BAI Yong-qing, *et al.* (4669)

Conversion Characterizations of Sulfate Ion and Nitrate Ion in Particulate Matter from Coal-fired Power Plants ····· YANG Liu, HE Qing, SHENG Zhong-yi (4678)

Water Chemical Characteristics and Influence of Exogenous Acids in the Yangtze River Basin ····· WANG Qi, YU Shi, JIANG Ping-ping, *et al.* (4687)

Effects of Land Use on Nutrient Concentrations in the Inflow River of Lake Taihu, China ····· LIAN Xin-qiao, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, *et al.* (4698)

Diversity of Zooplankton and Niche Characteristics of Keystone Species in the Weihe River Based on eDNA ····· LIANG Dong, XIA Jun, SONG Jin-xi, *et al.* (4708)

Occurrence, Distribution, and Ecological Risk Assessment of Pharmaceutical and Personal Care Products in the Aquatic Environment of Sanya City, China ····· REN Bing-nan, GENG Jing (4717)

Screening of Priority Pollutants and Risk Assessment for Surface Water from Shengjin Lake ····· GONG Xiong-hu, DING Qi-qi, JIN Miao, *et al.* (4727)

Long-term Changes and Drivers of Ecological Security in Shahe Reservoir, China ····· YANG Wen-bin, DUAN Wen-xiu, CUI Yang, *et al.* (4739)

Seasonal Variation and Influencing Factor Analysis of Antibiotic Resistance Genes in Water Supply Reservoirs of Central China ····· ZHANG Kai, XIN Rui, LI Kuang-jia, *et al.* (4753)

Geochemical Characteristics and Driving Factors of NO_3-Type Groundwater in the Rapidly Urbanizing Pearl River Delta ····· LÜ Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, *et al.* (4761)

Spatial Hydrochemical Characteristics and Controlling Factors of Surface Water in the Yancheng Area ····· WANG Jian, ZHANG Hua-bing, XU Jun-li, *et al.* (4772)

Identification of Dredging Depths Based on Sediment Vertical Distribution Profiles of Total Nitrogen and Total Phosphorus and Their Adsorption-desorption Equilibria ····· ZHOU Ya-ting, CHEN Xing-hong, LI Li-qing, *et al.* (4781)

Role of Borate and Phosphate Buffers in the Degradation of Organic Compounds in a PMS/Co^{2+} System: Influencing Factors and Mechanisms ····· WAN Qi-qi, CHEN Zhu-hao, CAO Rui-hua, *et al.* (4789)

Degradation 2,2′,4,4′-Tetrabromodiphenyl Ether by Activated Peroxymonosulfate Using Magnetic Biochar Supported α-MnO_2 ····· LI Xin, YIN Hua, LUO Hao-yu, *et al.* (4798)

Characteristics and Mechanisms of Bacteriophage MS2 Inactivation in Water by UV Activated Sodium Persulfate ····· ZHANG Chong-miao, YANG Hao-ming, WANG Zhen (4807)

Adsorption Characteristics of Phosphate on Cerium Modified Water Hyacinth Biochar ····· WANG Guang-ze, ZENG Wei, LI Shuai-shuai (4815)

Removal Efficiency and Mechanism of Ammonia Nitrogen in a Low Temperature Groundwater Purification Process ····· LI Dong, LIU Meng-hao, ZHANG Rui-miao, *et al.* (4826)

Speciation and Ecological Risk Assessment of Heavy Metal(loid)s in the Municipal Sewage Sludge of China ····· GENG Yuan-meng, ZHANG Chuan-bing, ZHANG Yong, *et al.* (4834)

Meta-analysis of Microbial Communities in the Activated Sludge of Wastewater Treatment Plants Under Different Climate Types ····· YANG Si-hang, QIN Ze-sheng, LIANG Man-chun (4844)

Partial Nitritation and Anaerobic Ammonia Oxidation Synergistic Denitrification to Remove Nitrogen and Carbon from Domestic Sewage ····· QIN Yan-rong, YUAN Zhong-ling, ZHANG Ming, *et al.* (4853)

Cultivation and Performance Analysis of Simultaneous Partial Nitrification, ANAMMOX, and Denitratation Granular Sludge ····· ZHOU Feng, LIU Yong-di, LI Wei (4864)

Application of Various Methods to Extract Microplastic from Typical Soils in China ····· ZHAO Xiao-li, LIU Zi-han, CONG Chen-yu, *et al.* (4872)

Evaluation and Sources of Heavy Metal Pollution in the Surface Soil of the Qaidam Basin ····· CHEN Liang, ZHANG Xi-ying, TANG Qi-liang, *et al.* (4880)

Content and Ecological Risks of Heavy Metals in Soil with Different Land Uses in a Rapidly Urbanizing Area ····· LI Meng-ting, SHEN Cheng, WU Jian, *et al.* (4889)

Selenium Geochemical Characteristics and Influencing Factors of Paddy Fields in Du'an County, Guangxi ····· LIU Fei, YANG Ke, XU Ren-ting, *et al.* (4897)

Carbonized Apple Branches Decrease the Accumulation and Damage of Cadmium on Apple Rootstock by Reducing DTPA-Cd in Soil ····· DENG Bo, XUN Mi, ZHANG Wei-wei, *et al.* (4908)

Accumulation and Health Risk of Heavy Metals in Cereals, Vegetables, and Fruits of Intensive Plantations in Hainan Province ····· YANG Jian-zhou, WANG Zhen-liang, GAO Jian-weng, *et al.* (4916)

Correlation Analysis among Environmental Antibiotic Resistance Genes Abundance, Antibiotics Concentrations, and Heavy Metals Concentrations Based on Web of Science Searches ····· MIAO Sun, CHEN Lei, ZUO Jian-e (4925)

Pollution Characteristics and Risk Assessment of Tetracycline Antibiotics in Farmland Soil in Yinchuan ····· ZHANG Xiao-hong, TAO Hong, WANG Ya-juan, *et al.* (4933)

Effect of Manure from Different Sources on the Leaching of Antibiotics in Soil ····· LI Bin-xu, ZHU Chang-xiong, SONG Ting-ting, *et al.* (4942)

Analysis of the Traits of Nitrogen Metabolism Pathways for Several Forest Soils in Eastern China ····· LÜ Xue-li, ZHAO Yong-peng, LIN Qing-huo, *et al.* (4951)

Denitrification Rates and *nirS*-type Denitrifying Bacteria Community Structure Characteristics of Bulk and Rhizosphere Soil in Spring and Summer in the Alpine Wetlands of the Qinghai-Tibet Plateau ····· LI Yu-qian, MA Jun-wei, GAO Chao, *et al.* (4959)

Microbial Community Structure of Soil Methanogens and Methanotrophs During Degradation and Restoration of Reed Wetlands in the Songnen Plain ····· WANG Qiu-ying, WANG Na, LIU Ying, *et al.* (4968)

Characteristics of Bacterial Community Structure in Fluvo-aquic Soil Under Different Rotation Fallow ····· NAN Zhen-wu, LIU Zhu, DAI Hong-cui, *et al.* (4977)

Response of Photosynthetic Bacterial Community to Cadmium Contamination in Paddy Soil ····· LUO Lu-yun, JIN De-cai, WANG Dian-dong, *et al.* (4988)

Community Distribution of the Rhizospheric and Endophytic Bacteria of *Phragmites australis* and Their Limiting Factors in Iron Tailings ····· CAO Man-man, WANG Fei, ZHOU Bei-hai, *et al.* (4998)

Effects of Combination of Organic and Inorganic Nitrogen on Nitrification and Denitrification in Two Salinized Soils ····· ZHOU Hui, SHI Hai-bin, ZHANG Wen-cong, *et al.* (5010)

Response of Yield, CH, and N_2O Emissions from Paddy Fields to Long-term Elevated CO_2 Concentrations ····· YU Hai-yang, SONG Kai-fu, HUANG Qiong, *et al.* (5021)

Effects of Feedstock Material and Pyrolysis Temperature on Dissolved Organic Matter in Biochars ····· YAN Dai-hong, MA Ya-pei, SONG Kai-yue, *et al.* (5030)

Spatiotemporal Variations in Atmospheric Urban Heat Island Effects and Their Driving Factors in 84 Major Chinese Cities ····· LI Yu, ZHOU De-cheng, YAN Zhang-mei (5037)

Research Progress in the Odorants and Their Emissions from Indoor Building Decoration Materials ····· ZHANG Wan-zhong, ZHANG Peng-yi (5046)