

清漯河(许昌段)浮游生物群落结构及其与环境因子关系

安婉玉¹, 郝子垚², 黎亚辉³, 于鲁冀^{1,2}

(1.郑州大学 生态与环境学院,郑州 450001;2.郑州大学 环境政策规划评价研究中心,
郑州 450000;3.河南中孚实业股份有限公司,郑州 451252)

摘 要:清漯河是典型的基流匮乏型河流,水生态环境质量空间差异明显,为探究浮游生物群落结构特征及其与水环境的关联性,于2021年7月在清漯河(许昌段)开展浮游生物及环境因子调查,基于综合水质标识指数及生物多样性指数分析水体污染程度,并利用典范对应分析法分析干流与支流河段浮游生物群落结构的关键影响因素.结果显示:本次调查共检出浮游植物8门204种,群落结构为绿藻-硅藻-蓝藻型;检出浮游动物4门88种,群落结构以轮虫、原生动物为主;浮游生物多样性指数及综合水质标识指数均显示清漯河(许昌段)水质为轻度污染,但浮游生物优势种显示其有富营养化可能.典范对应分析结果显示,不同河段影响浮游生物优势种密度的关键影响因素有所不同:干流及支流浮游植物群落结构分别受WT、TP、DO、 NO_3^- -N和 COD_{Cr} 、TN、 NO_2^- -N、原生动物的影响,干流及支流浮游动物群落结构分别受TSS、甲藻和 NO_2^- -N、 COD_{Cr} 、金藻、隐藻的影响.

关键词:清漯河;浮游生物;群落结构;环境因子;水质标识指数

中图分类号:X835

文献标志码:A

浮游植物和浮游动物是水生态食物网的重要组成部分,构成了水生态系统物质循环的基础,对维持食物网丰富性及稳定性具有重要作用^[1-2].浮游生物个体微小、生命力强、繁殖速度快,对环境因子的变化十分敏感,具有较好的指示作用,能够间接反映河流生态系统的生态演替及其他生态过程.目前,对于河流浮游生物的研究主要涉及浮游生物多样性及群落特征^[3]、水环境监测^[4]、水质评价^[1]及新技术的开发利用^[2]等.研究浮游生物群落对环境变化的响应过程,对受损河流的生态健康状况评估与管理具有重要意义.

清漯河属于淮河流域沙颍河水系,是许昌市防洪、排涝、纳污的重要河流,污染负荷比高达90%以上,是典型的强人工干扰河流^[5].且河道内闸门众多、结构复杂,河流碎片化严重,纵向连通性较差,兼具流量短缺和环境污染等问题.经过一系列水环境综合整治及河流生态修复工作,清漯河水质已得到明显改善,但水生生物结构尚未完全恢复,通过对清漯河(许昌段)水质及浮游生物状况进行调查,分别采用综合水质标识指数和多样性指数对清漯河(许昌段)进行水质评价,以期为清漯河流域水生生物多样性的恢复及水生态系统的健康发展提供依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况与样点设置

清漯河位于东经 $113^{\circ}35'$ ~ $114^{\circ}05'$ 、北纬 $33^{\circ}51'$ ~ $34^{\circ}11'$,是淮河流域沙颍河水系最大的支流,发源于新郑西沟草原,于长葛官厅乡进入许昌,并于鄢陵县陶城闸汇入颍河.清漯河(许昌段)为资源性缺水河段,年均气温 14.3°C ,年均降水量 727.5 mm ,丰水期(每年6—9月)降水量占年均降水量的70%.全长 79 km ,流域面积 $1\,584\text{ km}^2$,主要支流有灈陵河、小泥河、小洪河和石梁河等,由于缺乏自然径流的汇入,支流多为季节性河流.2021年7月,基于河流等级,从上游到下游共选取3个调查河段(13个点位)进行采样,详见附图1.

收稿日期:2022-07-26;修回日期:2022-10-10.

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2015ZX07204-002).

作者简介:安婉玉(1999—),女,河南许昌人,郑州大学硕士研究生,研究方向为水生态修复,E-mail:1922079636@qq.com.

通信作者:于鲁冀(1962—),E-mail:yuluji@126.com.

分别为:清漯河干流河段($Q_1 \sim Q_6$);一级支流小泥河河段($X_1 \sim X_5$);二级支流灞陵河河段(B_1 和 B_2),灞陵河在 X_3 处汇入小泥河。

1.2 环境因子测定、浮游生物采集与鉴定

对清漯河(许昌段)的水体理化参数进行调查测定,其中水温(WT)、pH、溶解氧(DO)采用美国哈希HQ40d多参数水质分析仪现场测定,化学需氧量(COD_{Cr})、总氮(TN)、氨氮(NH₃⁺-N)、硝态氮(NO₃⁻-N)、亚硝态氮(NO₂⁻-N)、总磷(TP)、总悬浮固体(TSS)等指标,在每个采样点使用采水器平行取3组250 mL水样,低温避光保存,指标测定参考文献^[6]。

浮游植物、原生动物及轮虫的定性样品采用25#浮游生物网采集,现场加入体积分数5%甲醛固定;定量样品采集后现场加入体积分数1%鲁哥试剂固定,枝角类和桡足类定性样品用13#浮游生物网采集,固定方法同上;定量样品加入体积分数5%甲醛试剂,样品带回实验室4℃保存,浮游植物使用光学显微镜鉴定与计数,鉴定主要参考文献^[7-9]。

1.3 综合水质标识指数和多样性指数计算

采用综合水质标识指数法对水质进行综合评价,具体参考文献^[10],浮游生物多样性指数多采用Margalef丰富度指数(D)^[4]、Shannon-Wiener多样性指数(H')^[11]、Pielou均匀度指数(J)^[12]进行分析,同时计算浮游生物的优势度(Y)^[13],计算公式如下: $D = \frac{(S-1)}{\ln N}$, $H' = -\sum_{i=1}^S \frac{n_i}{N} \ln \frac{n_i}{N}$, $J = \frac{H'}{\ln S}$, $Y = \frac{n_i}{N} f_i$, S 为样品的种类总数; N 为样品的总个体数; n_i 为第*i*个物种的个体总数; f_i 为样本个体的出现率,取优势度 $Y > 0.02$ 的物种认定为优势种, $Y > 0.1$ 的物种认定为绝对优势种。

1.4 典范对应分析

采用Cannoco 5.0软件进行典范对应分析,将浮游生物优势种密度数据及环境数据进行lg($x+1$)转化(pH除外)^[13],并进行去趋势对应分析(Detrended Correspondence Analysis,DCA),同时使用蒙特卡罗检验排除贡献较小的环境因子。经DCA分析,干流浮游动物选择CCA分析,干流浮游植物、支流浮游植物及支流浮游动物选择RDA分析。采用Excel 2019、SPSS 25、Origin 2018及Cannoco 5.0软件进行数据分析及作图。

2 结 果

2.1 环境因子

本次调查水温范围为27.3℃~29.2℃,均值为28.7℃;水体溶解氧质量浓度范围为3.37~13.96 mg/L,均值为8.8 mg/L;pH范围为7.34~8.67,均值为8.16,水体总体呈碱性;透明度值范围为0.30~2.20 m,均值为0.74 m;NH₃⁺-N质量浓度范围为0.02~4.84 mg/L,均值为1.37 mg/L;NO₃⁻-N质量浓度范围为0.20~6.06 mg/L,均值为1.66 mg/L;NO₂⁻-N质量浓度范围为0.003~0.019 mg/L,均值为0.006 5 mg/L;TN质量浓度范围为5.59~11.86 mg/L,均值为7.98 mg/L;TP质量浓度范围为0.01~0.20 mg/L,均值为0.06 mg/L;氮磷比范围为97.16~687.48,均值为245.70。基于《地表水环境质量标准:GB 3838—2002》,研究区域内各点位水环境功能区目标均为Ⅳ类,使用综合水质标识指数法对水质进行评价,评价结果详见附表I。整体看,干流水质优于支流,研究河段水质整体优良,有个别点位为轻度污染,主要污染因子为TN和NH₃⁺-N。

2.2 浮游生物群落结构

2.2.1 种类及密度

本次调查共检出浮游植物8门19目40科95属204种,其中绿藻门、硅藻门、蓝藻门和裸藻门分别为83、67、35、12种,分别占总种数的40.69%、32.84%、17.16%和5.88%;甲藻门和黄藻门各有3种和4种,分别占总种类数的1.47%和0.98%;隐藻门和金藻门仅检出1种,占总种数的0.49%。浮游植物密度变化范围在20.61×10⁴~473.70×10⁴ L⁻¹,平均密度126.13×10⁴ L⁻¹,不同河段浮游植物群落结构差异较大(图1)。其中,干流硅藻优势明显,密度贡献占比高达65.42%;支流绿藻占优势,且在灞陵河汇入后小泥河绿藻的密度占比明显增加,浮游植物密度也明显升高,均值由77.23×10⁴ L⁻¹增至268.50×10⁴ L⁻¹,但在X₅点位,浮游

植物密度呈大幅下降,且主要物种由绿藻转变为硅藻。

本次调查共检出浮游动物 4 门 12 目 31 科 48 属 88 种,其中,轮虫和原生动物占优势,种类占比达 43.18%、27.27%,而枝角类和桡足类种类数相当,分别占 15.91%、13.64%。浮游动物密度变化范围在 5 ~ 191 L⁻¹,平均密度 60 L⁻¹,不同河段浮游动物群落密度及物种组成具有一定的差异性(图 2)。干流以原生动物、桡足类为主,分别占 45.21%和 32.25%;灞陵河则以桡足类及枝角类为主;小泥河以轮虫为主,但在灞陵河汇入后,枝角类占比有所增加,同时物种数量呈骤增又骤减的趋势。

2.2.2 优势种

根据浮游植物优势度计算结果,共筛选出优势种 2 门 12 种(附表 II),干流 6 种,支流 9 种。干流优势种以硅藻为主,尖针杆藻为绝对优势种;支流优势种以绿藻为主,四尾栅藻为绝对优势种;四尾栅藻、简单舟形藻及汉斯冠盘藻在干流及支流均为优势种,说明三者在清漯河(许昌段)占据优势种。整体来看,干流及支流浮游植物优势种差异性较大。根据浮游动物优势度计算结果,共筛选出优势种 4 门 8 种(附表 III),干流 4 种,支流 6 种。干流优势种以桡足类为主,瘤棘砂壳虫、近邻剑水蚤为绝对优势种;支流优势种以轮虫为主,壶状臂尾轮虫和微型裸腹蚤为绝对优势种;透明剑水蚤和近邻剑水蚤为干流及支流的优势种,两者在清漯河(许昌段)占据优势种。

2.2.3 多样性指数

分别对清漯河 13 个采样点浮游植物及浮游动物的 Margalef 丰富度指数(D)、Shannon-Wiener 多样性指数(H')、Pielou 均匀度指数(J)进行计算,详见图 3。各点位浮游生物多样性指数波动较大,但 H' 和 J 表现出一致的空间变化趋势。对比浮游生物密度分布情况(图 1 和 2),发现多样性指数与浮游生物密度呈镶嵌分布,即在密度的高值区,浮游生物多为高密度的单一种群组成。除此之外,浮游植物与浮游动物多样性指数波动范围也有所不同,但其表征的水体健康状况结果一致。两者 H' 值分别介于 2.31~3.72、0.96~2.75,均值分别为 3.04、2.05; J 值分别介于 0.59~0.89、0.35~0.97,均值均为 0.75; D 值分别介于 2.99~5.81、1.41~6.19,均值分别为 4.04、4.47,结合相关评价标准(附表 IV),可见清漯河(许昌段)整体水质类型为清洁-寡污型,部分点位为 β -中污染型。

2.3 浮游生物群落结构与环境因子关系

2.3.1 浮游植物与环境因子相关性分析

在典范对应分析排序中,经过筛选,干流共确定 4 个环境因子,前两轴物种-环境相关系数分别为 0.999 7、1,累计解释了 99.22%的浮游植物优势种变化信息;支流共确定 4 个环境因子,前两轴物种-环境相

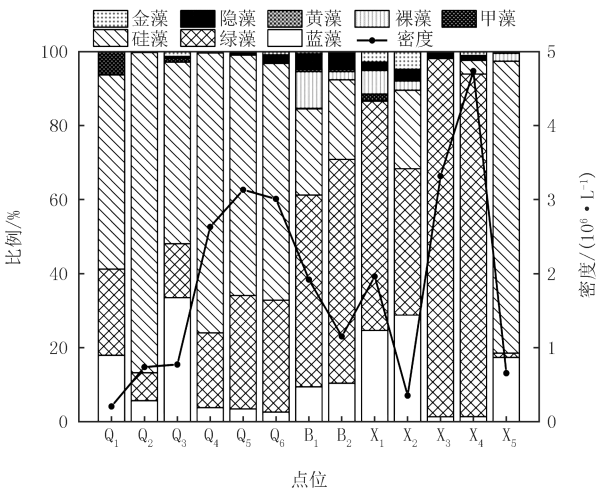


图1 采样点浮游植物密度变化
Fig.1 Changes of phytoplankton density at different sampling points

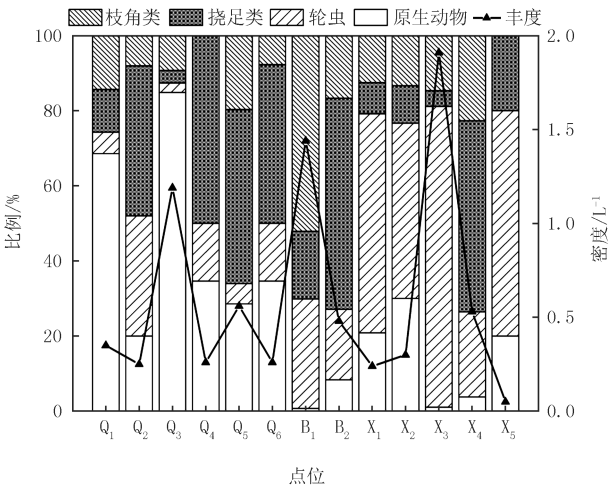


图2 采样点浮游动物密度变化
Fig.2 Variation of zooplankton density at different sampling points

关系数分别为 0.995 9、0.936 7, 累计解释了 90.17% 的浮游植物优势种变化信息, 表明排序结果可信. 蒙特卡罗检验结果显示(图 4), 在干流, 各优势种同 WT 、 $NO_3^- - N$ 、 TP 正相关, 同 DO 负相关; 在支流, 简单舟形藻同原生动物生物量正相关, 四尾栅藻、双尾栅藻、微茫藻、针形纤维藻和普通小球藻同原生动物生物量负相关, 汉斯冠盘藻、狭形纤维藻及柯氏并联藻同 TN 及 $NO_2^- - N$ 正相关, 除了简单舟形藻, 其余各优势种同 COD_{Cr} 均呈不同程度负相关关系.

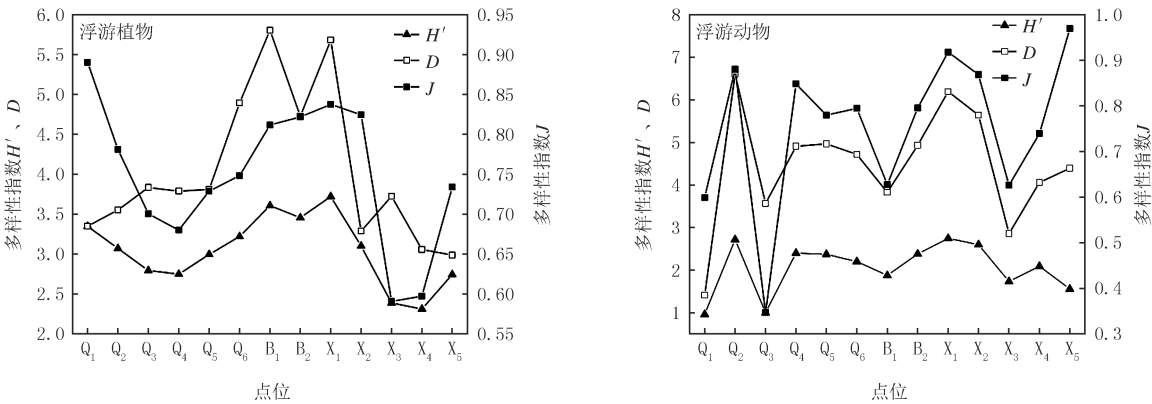


图3 清漯河(许昌段)浮游生物多样性指数
Fig.3 Qingyi River(Xuchang Section) plankton diversity index

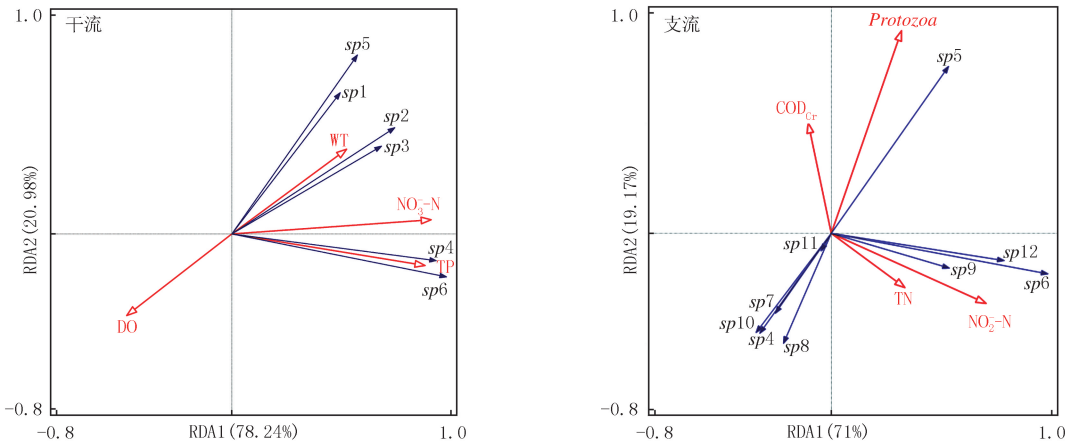


图4 浮游植物群落与环境因子冗余分析排序图
Fig.4 Redundancy analysis of phytoplankton community and environmental factors

2.3.2 浮游动物与环境因子相关性分析

在典范对应分析排序中, 经过筛选, 干流共确定 2 个环境因子, 前两轴物种-环境相关系数分别为 0.996 3、0.827 9, 累计解释了 100% 的浮游动物优势种变化信息; 支流共确定 4 个环境因子, 前两轴物种-环境相关系数分别为 0.999 8、0.999 4, 累计解释了 99.50% 的浮游动物优势种变化信息, 表明排序结果可信. 蒙特卡罗检验结果显示(图 5), 甲藻($P=0.006$)是影响干流浮游动物优势种密度变化的极显著影响因子. 在干流, 简弧象鼻蚤、瘤棘砂壳虫同甲藻生物量呈显著正相关, 透明温剑水蚤、近邻剑水蚤同 TSS 呈正相关关系; 在支流, 萼花臂尾轮虫、壶状臂尾轮虫同金藻生物量正相关, 其余优势种则同隐藻呈不同程度正相关关系.

3 讨 论

3.1 浮游生物群落结构

本次调查共鉴定出浮游植物 8 门 95 属 204 种, 平均密度 $1.26 \times 10^6 L^{-1}$, 群落结构为绿藻-硅藻-蓝藻型; 优势种 2 门 12 种, 以绿藻和硅藻为主; 浮游动物 4 门 48 属 88 种, 平均密度 $60 L^{-1}$, 群落结构以轮虫、原生动

物为主;优势种 4 门 8 种,以轮虫、桡足类为主.课题组于 2013—2015 年研究数据显示,清漯河共检出浮游植物 8 门 111 种,群落结构为绿藻-硅藻-蓝藻型,优势种以绿藻、硅藻为主;浮游动物 42 种,群落结构以轮虫为主,优势种以轮虫为主^[14].对比研究发现清漯河(许昌段)浮游植物群落结构保持不变,浮游动物群落则由以轮虫为主变为以轮虫、原生动物为主,浮游生物鉴定物种数有大幅提升,表明清漯河经过水环境综合整治,水质得到了明显改善;浮游生物鉴定物种数量得到大幅提升,这可能与研究区域范围相关,本次调研区域较前期范围广、调查点位更多;浮游植物优势种未发生明显改变,而浮游动物优势种则出现了寡污物种瘤棘砂壳虫^[15],表明清漯河水质的改善.

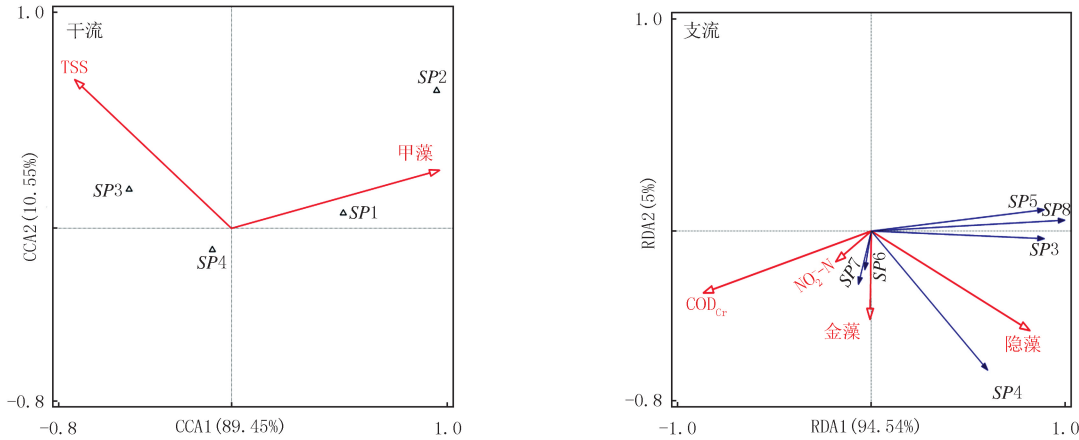


图5 浮游动物群落与环境因子冗余分析排序图

Fig. 5 Redundancy analysis of zooplankton community and environmental factors

浮游生物多样性结果显示,浮游植物多样性指数 H' 、 D 和 J 分别显示水体为清洁-寡污型、清洁-寡污型和寡污型;浮游动物三类指数分别显示水体为 β -中污型、清洁-寡污型和寡污型,说明研究区内浮游生物种类较多、密度较高,且分布均匀,清漯河(许昌段)整体水质为寡污型,但优势种仍以尖针杆藻、四尾栅藻、狭形纤维藻、针形纤维藻,近邻剑水蚤、萼花臂尾轮虫、壶状臂尾轮虫、微型裸腹蚤等中-富营养指示种^[15]为主,且综合水质标识指数评价结果显示仍有多个点位的 TN 和 NH_3^+-N 处于超标状态,说明虽然清漯河(许昌段)水质有所改善,但是生物群落结构目前仍不够稳定,仍有富营养化风险,可通过保障河道基流,恢复生物栖息地、采取相应生物措施以恢复生物群落结构.

3.2 浮游生物群落结构特征与环境因子关系

由典范对应分析结果可知,清漯河(许昌段)干流及支流浮游植物群落结构影响因子大相径庭,在干流,主要为 WT、TP、DO 及 NO_3^--N ;在支流,主要为 COD_{Cr} 、TN、 NO_2^--N 及原生动物密度.在干流, NO_3^--N 对优势种密度变化的解释度达到了 64.8%,主要与干流优势种以硅藻为主密切相关,有研究发现,相较于其他形态的氮硅藻更喜欢利用 NO_3^--N ^[16],故而受 NO_3^--N 影响较显著.同时,本研究发现浮游植物密度同 WT 显著正相关,却与 DO 显著负相关,这可能是由于 DO 受到了 WT 的影响,减弱了浮游植物的产氧量对 DO 的作用^[4].在支流,各因子及各优势种在排序图上分布较为均匀(图 5),说明支流浮游植物优势种分布变化受各环境因子综合影响较为显著.一方面,浮游植物的生长繁殖需要营养物质,受到营养盐浓度的影响;另一方面,作为滤食浮游动物的食物,受原生动物摄食行为的影响.干流浮游植物优势种分布变化受营养盐影响较支流显著主要与浮游植物对营养盐的吸收机制有关,依据 Redfield 定律,当水体中氮磷比偏离最佳值(16)时,那么某一元素的影响就会变得显著^[17],而干流氮磷比均值高达 388.72,远高于支流的 129.04,故而受氮盐影响更大.

由典范对应分析结果可知,清漯河(许昌段)干流及支流浮游动物群落结构影响因子具有差异性,干流浮游动物群落结构受 TSS 和甲藻生物量的影响,支流浮游动物群落结构受 NO_2^--N 、 COD_{Cr} 、金藻及隐藻生物量的影响.在干流,甲藻密度对优势种密度变化的解释度高达 63%,主要与瘤棘砂壳虫密切相关,作为干流的绝对优势种,瘤棘砂壳虫主要以甲藻、微型轮虫等为食^[18],而干流优势种未出现轮虫,说明其密度较小,故而

受甲藻密度影响较大;同时,由于本次调查在 7 月开展,已有研究表明近邻剑水蚤及透明温剑水蚤在食物充足的夏季,更倾向于以体型较小的枝角类为食^[18],而枝角类多为滤食者,主要受水体细菌、腐殖质等颗粒物浓度的影响,故而受 TSS 浓度的影响.在支流,COD_{Cr} 及 NO₂⁻-N 对优势种密度空间变化的解释度达到 77.2%,研究表明,COD、NO₂⁻-N 等营养盐可通过上行效应调控浮游动物的群落组成^[3],且 NO₂⁻-N 对于异养生活的浮游动物可能具有一定的毒害作用.同时,隐藻被认为是影响轮虫结构变化的最重要的浮游植物^[19],微型裸腹蚤也作为滤食者受水体中浮游植物密度影响,与本研究发现浮游动物优势种受隐藻和金藻生物量影响结果一致.并且本研究发现同一优势种受不同藻类影响具有差异性:相较于隐藻,臂尾轮虫属受金藻影响较大,这可能与物种对食物的偏好有关,在高温环境,臂尾轮虫属对金藻的摄食率会有所增加^[20],故而相较于其他优势种受金藻生物量影响较大.

4 结 论

(1)清漯河(许昌段)共检出浮游植物 8 门 95 属 204 种,群落结构为绿藻-硅藻-蓝藻型,优势种以绿藻和硅藻为主;检出浮游动物 4 门 48 属 88 种,群落结构以轮虫、原生动物为主,优势种以轮虫为主;浮游生物优势种多为富营养指示种,说明研究区内水体仍有富营养化风险.

(2)水质标识指数评价结果表明研究河段水质良好,部分点位为轻度污染;生物多样性指数显示研究河段为清洁-寡污型,部分点位为 β-中污染型,两者结果具有较好的一致性.

(3)典范对应分析表明,清漯河(许昌段)浮游生物群落变化受环境因子影响明显,且具有空间差异性.引起浮游植物群落结构变化的主要因子有 NO₃⁻-N、NO₂⁻-N、WT、原生动物密度等;引起浮游动物群落结构变化的主要因子有 TSS、NO₂⁻-N 及浮游植物密度等.

附 录

附图 I、附表 I ~ IV 见电子版(DOI:10.16366/j.cnki.1000-2367.2023.05.017).

参 考 文 献

[1] ZHANG N,ZANG S Y.Characteristics of phytoplankton distribution for assessment of water quality in the Zhalong Wetland,China[J].International Journal of Environmental Science and Technology,2015,12(11):3657-3664.

[2] BIZIC M.Phytoplankton photosynthesis:an unexplored source of biogenic methane emission from oxic environments[J].Journal of Plankton Research,2021,43(6):822-830.

[3] 宋高飞,朱宇轩,米武娟,等.武汉市湖泊浮游动物群落特征及其影响因素[J].河南师范大学学报(自然科学版),2022,50(3):135-142.

SONG G F,ZHU Y X,MI W J,et al.Characteristics of zooplankton community and their influencing factors in lakes of Wuhan[J].Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition),2022,50(3):135-142.

[4] 施军琼,何书哈,欧阳添,等.三峡库区支流花溪河浮游植物种间关联及影响因子分析[J].河南师范大学学报(自然科学版),2022,50(5):110-116.

SHI J Q,HE S H,OUYANG T,et al.Analysis of phytoplankton interspecific association and its influencing factor in Huaxi River,a tributary of the Three Gorges Reservoir[J].Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition),2022,50(5):110-116.

[5] 刘思伟.基于优先保护鱼类的清漯河栖息地评估及恢复技术应用研究[D].郑州:郑州大学,2020.

LIU S W.Study on the application of habitat assessment and restoration technology of Qingyi river based on priority conservation fish[D].Zhengzhou:Zhengzhou University,2020.

[6] 国家环境保护总局.水和废水监测分析方法[M].4 版.北京:中国环境科学出版社,2002.

[7] 王业耀,阴琨,许人骥,等.中国流域常见水生生物图集[M].北京:科学出版社,2020.

[8] 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.

[9] 周凤霞,陈剑虹.淡水微型生物图谱[M].北京:化学工业出版社,2005.

[10] 徐祖信.我国河流综合水质标识指数评价方法研究[J].同济大学学报(自然科学版),2005,33(4):482-488.

XU Z X.Comprehensive water quality identification index for Environmental Quality assessment of surface water[J].Journal of Tongji University(Natural Science),2005,33(4):482-488.

[11] SHANNON C E,WEAVER W,WIENER N.The Mathematical Theory of Communication[J].Physics Today,1950,3(9):31-32.

[12] PIELOU E C.Species-diversity and pattern-diversity in the study of ecological succession[J].Journal of Theoretical Biology,1966,10(2):

370-383.

[13] 白海峰,王怡睿,宋进喜,等.渭河浮游生物群落结构特征及其与环境因子的关系[J].生态环境学报,2022,31(1):117-130.
BAI H F,WANG Y R,SONG J X,et al.Characteristics of plankton community structure and its relation to environmental factors in Weihe River,China[J].Ecology and Environment Sciences,2022,31(1):117-130.

[14] 郝明辉.清渭河流域氨氮水生生物基准研究[D].郑州:郑州大学,2018.
HAO M H.Preliminary Aquatic Life Criteria Development of Ammonia in Qingyi River Basin[D].Zhengzhou:Zhengzhou University,2018.

[15] 胡艺,李秋华,何应,等.贵州高原水库浮游动物分布特征及影响因子:以阿哈水库为例[J].中国环境科学,2020,40(1):227-236.
HU Y,LI Q H,HE Y,et al.Spatial and temporal distribution characteristics and influencing factors of metazooplankton in Aha Reservoir, Guizhou Province[J].China Environmental Science,2020,40(1):227-236.

[16] 许海,陈丹,陈洁,等.氮磷形态与浓度对铜绿微囊藻和斜生栅藻生长的影响[J].中国环境科学,2019,39(6):2560-2567.
XU H,CHEN D,CHEN J,et al.Effects of nitrogen and phosphorus forms and concentrations on the growth of *Microcystis aeruginosa* and *Scenedesmus obliquus*[J].China Environmental Science,2019,39(6):2560-2567.

[17] DIEZ B,NIEUWERBURGH L,SNOEIJIS P.Water nutrient stoichiometry modifies the nutritional quality of phytoplankton and somatic growth of crustacean mesozooplankton[J].Marine Ecology Progress Series,2013,489:93-105.

[18] 邓道贵,杨威,孟小丽,等.淮河中浮游甲壳动物群落结构的季节动态[J].水生生物学报,2013,37(5):869-875.
DENG D G,YANG W,MENG X L,et al.Seasonal variations of crustacean zooplankton community structure in the middle reaches of the Huaihe River[J].Acta Hydrobiologica Sinica,2013,37(5):869-875.

[19] 王松波,耿红.富营养湖泊中轮虫群落结构季节变化的环境驱动力研究[J].长江流域资源与环境,2013,22(3):343-352.
WANG S B,GENG H.Forces driving the seasonal changes of a rotifer community in a eutrophic Chinese Lake[J].Resources and Environment in the Yangtze Basin,2013,22(3):343-352.

[20] 孙运菲.轮虫摄食棕囊藻的环境因子效应及多组学水平上的差异分析[D].南京:南京师范大学,2020.
SUN Y F.Effects of environmental factors on rotifers'ingestion of *Phaeocystis fusca* and their differences at the level of multi-omics[D]. Nanjing:Nanjing Normal University,2020.

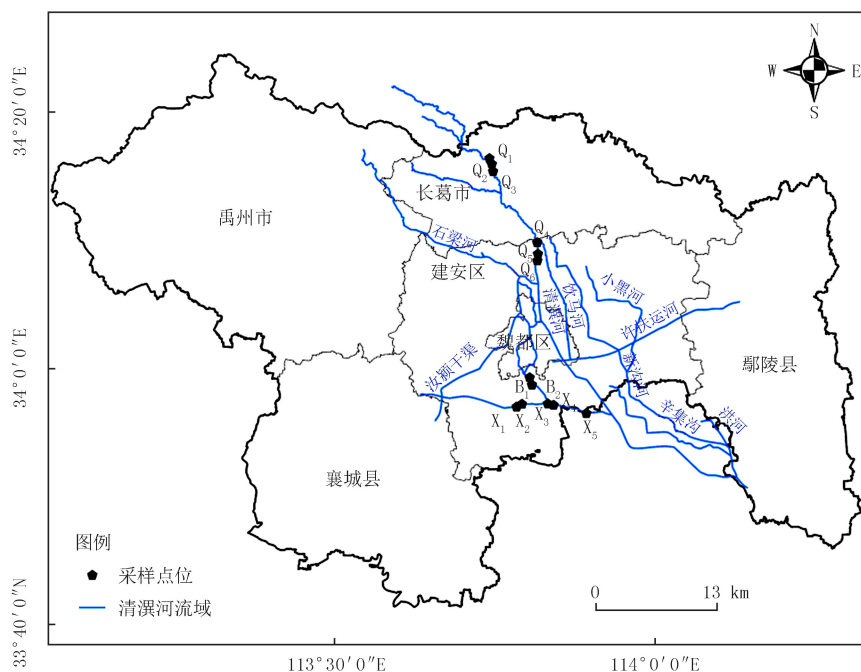
Plankton community structure and its relationship with environmental factors in Qingyi River(Xuchang section)

An Wanyu¹, Hao Ziyao², Li Yahui³, Yu Lujia^{1,2}

(1. School of Ecology and Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Research Center for Environmental Policy & Assessment of Zhengzhou University, Zhengzhou 450000, China; 3. Henan Zhongfu Industrial Co., Ltd.,Zhengzhou 451252, China)

Abstract: Qingyi River is a basal flow-scarce river, which has the obvious spatial differences in the quality of the water ecological environment. To explore the structural characteristics of plankton communities and their correlation with the aquatic environment, Plankton and environmental factor surveys were carried out in the Qingyi River(Xuchang section)in July 2021. This study evaluated the water quality in Qingyi river by using the improved comprehensive water quality identification index (WQI)and biodiversity index, and explored the relationships between the structures of the zooplankton and phytoplankton communities and environmental factors using canonical correspondence analysis(CCA). The results showed that 204 phytoplankton species belonged to 8 phyla, among which Chlorophyta,Bacillariophyta and Cyanophyta had higher richness. In addition, 88 zooplankton species belonged to 4 major categories, dominated by Protozoa and Rotifer. The diversity of plankton and WQI indicates that the water body is light pollution, but the dominant species of plankton show the possibility of increasing eutrophication. Meanwhile, the results of CCA showed that the main influencing factors of the structure of the plankton community in the main stream and tributaries are different. The community structure of main stream phytoplankton was mainly affected by WT, TP, DO and NO₃⁻-N, while in the tributaries, by COD_{Cr}, TN, NO₂⁻-N and protozoal density. The community structure of main stream zooplankton was mainly affected by TSS and Dinophyta, while in the tributaries, by NO₂⁻-N, COD_{Cr}, Chrysophyta and Cryptophyta density.

Keywords: Qingyi River; plankton; community structure; environmental factors; water quality identification index



附图 I 采样点示意图
Attached fig. I Schematic diagram of sampling point

附表 I 水质标识指数法对环境因子的评价
Attached tab. I Evaluation of environmental factors by water quality marking index method

点位	pH	WT/℃	透明度/m	单因子标识指数					综合水质 标识指数	综合水质 定性评价
				DO	COD _{Cr}	NH ₃ ⁺ -N	TP	TN		
Q ₁	8.66	27.30	2.20	1.10	1.30	1.00	2.00	8.52	2.710	优良
Q ₂	8.25	27.80	1.00	1.10	1.40	1.10	1.50	8.42	2.710	优良
Q ₃	8.67	29.20	1.00	1.10	1.40	1.10	1.80	9.22	2.910	优良
Q ₄	7.68	28.00	0.50	3.90	1.80	1.50	2.30	10.42	3.910	优良
Q ₅	7.96	28.80	0.30	1.10	1.60	1.20	2.30	10.21	3.210	优良
Q ₆	8.03	28.60	0.50	1.10	1.10	1.50	2.40	10.12	3.210	优良
B ₁	8.60	29.60	0.40	1.10	1.00	7.42	3.00	9.42	4.320	优良
B ₂	8.47	30.20	0.40	1.10	1.80	6.22	4.00	10.92	4.820	优良
X ₁	8.25	27.90	0.60	1.10	2.00	1.30	2.00	6.01	2.410	优良
X ₂	7.34	29.20	0.30	4.80	6.12	2.00	2.50	5.21	4.120	优良
X ₃	7.96	30.10	0.70	2.10	2.00	7.42	2.40	10.32	4.820	优良
X ₄	7.58	28.50	1.00	4.00	4.60	7.22	3.00	9.92	5.721	轻度污染
X ₅	8.58	28.20	1.00	1.10	2.00	3.10	2.00	7.82	3.210	优良

附表Ⅱ 清漯河(许昌段)浮游植物优势种
Attached tab.Ⅱ Predominant species of phytoplankton in Qingyi River(Xuchang section)

物种编号	优势种	Y	
		干流	支流
sp1	钝脆杆藻 <i>Fragilaria capucina</i>	0.042	—
sp2	尖针杆藻 <i>Synedra acus</i>	0.255	—
sp3	二角盘星藻纤细变种 <i>Pediastrum duplex</i> var. <i>gracillimum</i>	0.024	—
sp4	四尾栅藻 <i>Scenedesmus quadricauda</i>	0.044	0.159
sp5	简单舟形藻 <i>Navicula simplex</i>	0.048	0.045
sp6	汉斯冠盘藻 <i>Stephanodiscus hantzschii</i>	0.038	0.025
sp7	双尾栅藻 <i>Scenedesmus bicaudatus</i>	—	0.079
sp8	微芒藻 <i>Micractinium pusillum</i>	—	0.036
sp9	狭形纤维藻 <i>Ankistrodesmus angustus</i>	—	0.030
sp10	针形纤维藻 <i>Ankistrodesmus acicularis</i>	—	0.094
sp11	普通小球藻 <i>Chlorella vulgaris</i>	—	0.037
sp12	柯氏并联藻 <i>Quadrigula chodatii</i>	—	0.029

注：“—”表示该物种在这个河段不是优势种,下表同。

附表Ⅲ 清漯河(许昌段)浮游动物优势种
Attached tab.Ⅲ Dominant species of zooplankton in Qingyi River(Xuchang section)

物种编号	优势种	Y	
		干流	支流
SP1	筒弧象鼻溞 <i>Bosmina coregoni</i>	0.022	—
SP2	瘤棘砂壳虫 <i>Difflugia tuberspinifera</i>	0.456	—
SP3	透明温剑水蚤 <i>Thermocyclops hyalinus</i>	0.033	0.023
SP4	近邻剑水蚤 <i>Cyclops vicinus</i>	0.157	0.099
SP5	独角聚花轮虫 <i>Conochilus unicornis</i>	—	0.030
SP6	萼花臂尾轮虫 <i>Brachionus calyciflorus</i>	—	0.065
SP7	壶状臂尾轮虫 <i>Brachionus urceus</i>	—	0.212
SP8	微型裸腹溞 <i>Moina micrura</i>	—	0.176

附表Ⅳ 多样性指数评价标准
Attached tab.Ⅳ Diversity Index Evaluation Criteria

多样性指数		评价标准		
<i>D</i>	(0,1]重污型	(1,2] α-中污型	(2,3] β-中污型	>3 清洁-寡污型
<i>H'</i>	(0,1]重污型	(1,2] α-中污型	(2,3] β-中污型	>3 清洁-寡污型
<i>J</i>	(0.0,0.3] α-中污型	(0.3,0.5] β-轻污型	(0.5,0.8]寡污型	(0.8,1.0]清洁型