

DOI: 10.5846/stxb202101090091

田盼盼, 桑 翀, 马徐发, 沈建忠, 周 琼. 基于周丛藻类群落结构的新疆额尔齐斯河生态健康评价. 生态学报, 2022, 42(2): 778-790.

Tian P P, Sang C, Ma X F, Shen J Z, Zhou Q. Ecological health assessment of Irtysh River in Xinjiang Uygur Autonomous Region based on the community structure of periphytic algae. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(2): 778-790.

基于周丛藻类群落结构的新疆额尔齐斯河生态健康评价

田盼盼^{1,2}, 桑 翀^{1,2}, 马徐发^{1,2}, 沈建忠^{1,2}, 周 琼^{1,2,*}

1 华中农业大学水产学院, 农业农村部淡水生物繁育重点实验室, 武汉 430070

2 长江经济带大宗水生生物产业绿色发展教育部工程研究中心, 武汉 430070

摘要:周丛藻类对水环境变化较为敏感,可迅速而灵敏的反映水质健康状况。本研究于 2019 年对额尔齐斯河周丛藻类群落结构和水环境特征进行了系统调查,并运用周丛藻类生物完整性指数(Periphytic algae index of biotic integrity, P-IBI)对生态健康进行了评价。结果表明:额尔齐斯河周丛藻类有 6 门 41 属 102 种,以硅藻门为主。周丛藻类密度和生物量的时间变化趋势为:9 月>7 月>5 月,空间分布趋势为中下游>上游、支流>干流。主成分分析(PCA)与典范对应分析(CCA)显示,影响周丛藻类群落结构的主要环境因子有水温、溶解氧、高锰酸盐指数、氨氮、硝酸盐氮、pH、悬浮物,不同月份的环境影响因素有所差异。额尔齐斯河周丛藻类多样性指数(H')、丰富度指数(D)、Pielou 均匀度指数(J)的平均值分别为 3.52、3.02、0.75,显示额尔齐斯河流域整体水质为寡污或无污。P-IBI 分析结果显示:5 个采样点为健康状态,1 个采样点为亚健康状态,3 个采样点为一般状况,1 个采样点极差,表明额尔齐斯河整体生态健康状况趋于良好。本研究可为额尔齐斯河的水环境监测提供一种有效手段,并为该流域的水生态保护提供基础资料及理论依据。

关键词:额尔齐斯河;周丛藻类;群落结构;生物完整性;健康评价

Ecological health assessment of Irtysh River in Xinjiang Uygur Autonomous Region based on the community structure of periphytic algae

TIAN Panpan^{1,2}, SANG Chong^{1,2}, MA Xufa^{1,2}, SHEN Jianzhong^{1,2}, ZHOU Qiong^{1,2,*}

1 Key Laboratory of Freshwater Animal Breeding, Ministry of Agriculture and Rural Areas, College of Fisheries, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

2 Engineering Research Center of the Ministry of Education for the Green Development of Bulk Aquatic Biological Industry in the Yangtze River Economic Belt, Wuhan 430070, China

Abstract: Periphytic algae are sensitive to the changes of aquatic environment and can reflect the health status of water quality quickly. In this study, the community structure and water environment characteristics of algae around the Irtysh River were investigated systematically in 2019, and the biological integrity index of periphytic algae was used to evaluate the ecological health. The results showed that there were 102 species of algae belonging to 41 genera and 6 phyla, mainly Bacillariophyta. The temporal change of density and biomass for periphytic algae was September > July > May, and the spatial distribution was middle and lower reaches > upstream, tributaries > trunk stream. Principal component analysis (PCA) and canonical correspondence analysis (CCA) showed that the main environmental factors affecting the community structure of peripheral algae were water temperature, dissolved oxygen, permanganate index, ammonia nitrogen, nitrate

基金项目:农业农村部财政专项“西北地区重点水域渔业资源与环境调查”

收稿日期:2021-01-09; 网络出版日期:2021-09-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hainan@mail.hzau.edu.cn

nitrogen, pH and suspended matter. The average values of algal diversity index (H'), richness index (D) and Pielou evenness index (J) around the Irtysh River were 3.52, 3.02 and 0.75, respectively, indicating that the overall water quality of the Irtysh River basin is pollution-free or non-pollution. the results of P-IBI analysis showed that 5 sampling sites were healthy, 1 sampling site was sub-healthy, 3 sampling sites were general, and 1 sampling site was very poor, suggesting that the overall ecological health of the Irtysh River tended to be good. The results of this study can provide an effective measure for aquatic environment monitoring of Irtysh River and, meanwhile, provide basic data and theoretical references for the ecological protection of Irtysh River basin.

Key Words: Irtysh River; periphytic algae; community structure; biological integrity; health assessment

周丛藻类作为水体重要的初级生产者,附着于各种基质表面,为鱼类等水生动物提供食物来源和栖息场所^[1-2]。它具有生活环境稳定、生命周期较短、繁殖快、群落物种丰富等优点,相较浮游藻类能更好地反映水质状况。其耐受力较强,生长环境受到破坏时,无法迁移躲避,因此可通过周丛藻类的群落结构特征来准确反映河流环境的相应变化^[3-4]。此外,周丛藻类能够在短时间内实现群落结构的重建,迅速而灵敏的反映水质健康状况。周丛藻类的生长与繁殖受水温、光照、营养盐等多种理化因子的影响,环境因子的改变会引起周丛藻类物种组成^[5-7]、数量^[8-9]及分布差异^[10-11]。因此,国内外很多学者将周丛藻类作为河流水质健康的监测生物,并广泛应用于河流生态系统的健康评价^[12-13]。

额尔齐斯河为新疆第二大河流,也是我国唯一注入北冰洋的国际河流。该河发源于新疆北部的阿尔泰山南麓,由额尔齐斯河水系、乌伦古河水系、吉木乃诸小河水系构成。流域内全部支流均由北向南汇入干流,使额尔齐斯河水系呈单向梳状不对称性^[14]。额尔齐斯河全长 4248 km,其在中国境内河长为 633 km,流域面积为 $5.70 \times 10^4 \text{ km}^2$,年径流量为 $111.09 \times 10^8 \text{ m}^3$,是阿勒泰地区最大的河流。近年来,大量水利工程的建设与引水设施对额尔齐斯河部分支流及河段的生态环境造成了一定程度的破坏和影响^[15]。本研究通过调查额尔齐斯河周丛藻类群落结构特征及其与环境因子之间的相关性,并运用周丛藻类生物完整性指数(P-IBI)对额尔齐斯河水生态进行健康评价,为额尔齐斯河流域的保护与管理提供生态学数据。

1 材料与方法

1.1 采样时间与采样点设置

由于气候、水文等环境因素的影响,不同的水文期水量变化显著。考虑到每年的洪水期(6至8月)及冰封期(11至3月)对流域生态环境的影响,本研究于2019年5月(平水期)、7月(丰水期)、9月(枯水期)依据河道情势、交通条件、采样条件等因素,在额尔齐斯河流域中国境内河段选取10个典型采样点(图1)对周丛藻类进行定性和定量采集。

1.2 样品采集及水体理化指标的测定

在选择采样点上下游 100 m 范围内,依据河流生境类型(流速、水深和透明度)对周丛藻类进行定性和定量采集。周丛藻类定性样品通过天然基质取样,用硬毛刷将附着在石头上的藻类刷入装有蒸馏水的磁盘中,转移至塑料瓶,带至实验室浓缩至 50 mL 样品瓶中,并加入甲醛溶液固定保存(国家环保局《水生生物监测手册》编委会 1993)。定量样品通过选择附有藻类的形状规则、易于测量表面积的石块,每块石头用毛刷刮取面积为 20 cm^2 的藻类并用蒸馏水冲刷至不锈钢托盘中,然后转移至塑料瓶中,定容至 1 L,加入鲁哥氏液 15 mL 进行固定,并带回室内沉淀 24—48 h,通过虹吸法定容至 50 mL^[13]。

通过便携式水质分析仪 Alalis MP 3500(Alalis,中国上海)测定水体中 pH 值、溶解氧(DO)、水温(WT)、固体悬浮物(SS)等物理参数。同时收集水样 500 mL 低温保存,48 h 内带回新疆维吾尔自治区水产科学研究所实验室,根据标准方法^[16]测定挥发酚(Vol)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})、钙镁总量、氨氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)、亚硝酸氮

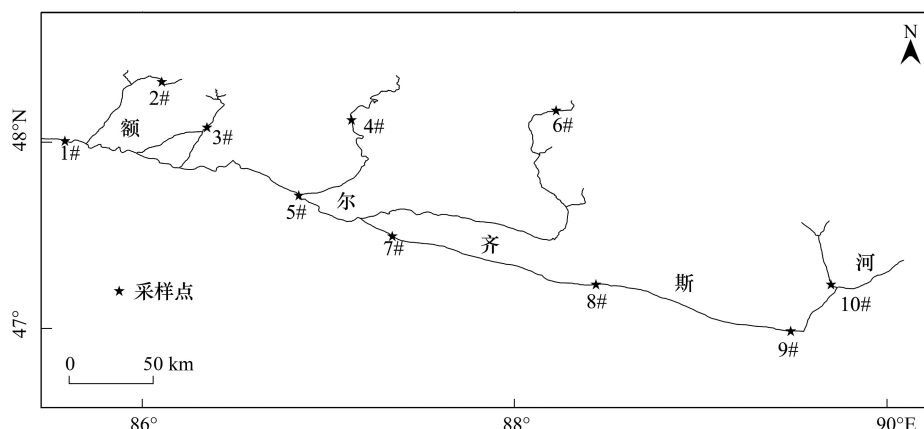


图1 额尔齐斯河水质与生物样品的采样点分布

Fig.1 Distribution of sampling sites for water quality and biological samples in the Irtys river

采样点代码:1#:185团湾;2#:别列则克;3#:哈巴河;4#:冲乎尔乡;5#:布尔津河口;6#:克兰河小东沟;7#:盐池;8#:635枢纽;9#:富蕴县;10#:可可托海

($\text{NO}_2\text{-N}$)、硝酸氮($\text{NO}_3\text{-N}$)、总氮(TN)、总磷(TP)、六价铬(COD_{Cr})和氰化物(CN)等化学指标。

1.3 种类鉴定与计算方法

将处理好的样品在 $\times 40$ 倍光学显微镜下进行观察,通过0.1 mL计数板对周丛藻类进行定量计数,每片计数不得少于300个,每瓶样品计数2次,2次计数结果之差应在15%之内,否则增加计数次数,有效统计数值取平均后即为该片的周丛藻类数量。藻类的鉴定主要参照《中国淡水藻类》^[17]和《淡水和污水生物学手册》^[18]等工具书。每个样品的周丛藻类密度由单位面积上的细胞个体数表示($\text{个}/\text{m}^2$)。最后计算出每种着生藻类的相对丰度(用百分含量表示)和每个采样点的藻密度。生物量的测算采用体积换算法^[19],根据周丛藻类的体形,按最近似的几何形测量其体积、形状特殊的种类分解为几个部分测量,然后结果相加。生物量为各种藻类的数量乘以各自的平均体积,单位为 mg/m^2 。

1.4 物种多样性指数与优势度

本研究使用 Shannon-wiener 多样性指数(H')^[20]、Pielou 均匀度指数(J)^[21]以及 Margalef 丰富度指数(D)^[22]描述周丛藻类群落结构特征,计算公式如下:

$$H' = -\sum (N_i/N) \log_2(N_i/N) \quad (1)$$

$$D = (S-1)/\log_2 N \quad (2)$$

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

$$Y = (N_i/N) f_i \quad (4)$$

式中, N_i 为第*i*种藻类密度; N 为总密度; S 为藻类物种数; f_i 为第*i*种藻类各采样点出现频率。将 $Y \geq 0.02$ 的藻类定为优势种。 H' 值0—1为重污,1—2为 α -中污型,2—3为 β -中污型, >3 为寡污型或无污。

1.5 周丛藻类生物完整性(P-IBI)评价指标体系及标准

生物完整性指数(Index of biotic integrity, IBI)创建于20世纪80年代,该方法开创了河流健康评价方式与方法的新局面,被广泛应用于全球领域河流健康的评价^[23-26]。通过构建合适的IBI体系,结合相应的环境指标,分析二者之间的相关性,从而高效、灵敏的指示河流健康状况以及人类活动对水体的干扰^[27]。

本研究首先选取34个对干扰响应较敏感的特征参数作为候选指标,并对这34个候选参数进行分布范围、判别能力和相关性分析的筛选^[12,28-29]。然后并结合参考相关文献^[30-31],根据经验法以额尔齐斯河的水文状况和环境特征作为选取参照点的首要评判基准^[32],找出受人类干扰较小的点位作为参照点。

对确定的核心参数进行比值法赋分^[33],所有核心参数计算后的分值总和为该采样点的P-IBI值。以参照

点 P-IBI 的 25%分位值为健康阈值,将其四等分划分为 5 个评价等级:健康、亚健康、一般、差、极差,将其作为 P-IBI 体系的评价标准。最后,利用 Mann-Whitney U 非参数检验以及对不同月份 P-IBI 值进行单因素方差分析 ($P<0.05$) 来对评价结果的准确性进行验证。

1.6 数据统计分析

本研究使用 Excel 对各样点水环境因子数据进行初步统计处理,然后进行主成分分析 (Principal component analysis, PCA) 与偏相关分析 (Partial correlation test, PCT),最后筛选出影响额尔齐斯河流域水环境的主要环境因子 ($P<0.05$)。对各采样点的周丛藻类数据进行除趋势对应分析 (Detrended correspondence analysis, DCA),根据 DCA 结果中 4 个轴中梯度最长值的大小,选择单峰或者线性模型。如果(最大值)超过 4,选择单峰模型典范对应分析 (Canonical correspondence analysis, CCA) 更合适;如果小于 3,选择线性模型冗余分析 (Redundancy analysis, RDA) 比较合理;若介于 3—4 之间,单峰模型和线性模型都是合适的^[34]。统计分析时,除 pH 值以外的所有水体理化数据和周丛藻类数据均进行数据转化 [$\lg(x+1)$]。

2 结果与分析

2.1 周丛藻类群落结构特征

额尔齐斯河流域 10 个典型采样点共鉴定周丛藻类 6 门 41 属 102 种,其中硅藻门种类数量最多(67 种, 65.69%),其次是绿藻门(20 种, 19.61%),蓝藻门与裸藻门均有 6 种(5.88%),隐藻门 2 种(1.96%),黄藻门 1 种(0.98%)。各个月份优势种均属硅藻门种类(表 1),其中 5 月优势种主要有普通等片藻 (*Diatoma vulgare*)、偏肿桥弯藻 (*Cymbella laevis*)、扁圆卵形藻 (*Cocconeis placentula*)、橄榄形异极藻 (*Gomphonema olivaceum*) 等,7 月优势种主要有偏肿桥弯藻、极小桥弯藻 (*C. perpusilla*)、长等片藻 (*D. elongatum*) 等,9 月优势种主要有窄异极藻 (*G. angustatum*)、系带舟形藻 (*Navicula cincta*)、双头针杆藻 (*Synedra amphicephala*) 等。参照《淡水和污水生物学手册》^[18],额尔齐斯河流域周丛藻类优势种以寡污带(长等片藻、窄异极藻、弧形峨眉藻等)和 β -中污带指示种(普通等片藻、偏肿桥弯藻、橄榄形异极藻等)为主,水体健康状况整体上较好。

表 1 周丛藻类优势种及其编号

Table 1 The dominant species and corresponding codes of periphytic algae

编号 Code	物种 Species	5 月 May	7 月 July	9 月 Spet	编号 Code	物种 Species	5 月 May	7 月 July	9 月 Spet
sp1	普通等片藻 <i>Diatoma vulgare</i>	✓	✓		sp9	双头针杆藻 <i>Synedra amphicephala</i>		✓	✓
sp2	偏肿桥弯藻 <i>Cymbella laevis</i>	✓	✓	✓	sp10	弧形峨眉藻 <i>Ceratoneis arcus</i>		✓	
sp3	扁圆卵形藻 <i>Cocconeis placentula</i>	✓		✓	sp11	系带舟形藻 <i>Navicula cincta</i>			✓
sp4	橄榄形异极藻 <i>Gomphonema olivaceum</i>	✓	✓		sp12	弯曲桥弯藻 <i>Cymbella pussilla</i>			✓
sp5	极小桥弯藻 <i>Cymbella perpusilla</i>	✓	✓		sp13	近缘桥弯藻 <i>Cymbella affinis</i>			✓
sp6	长等片藻 <i>Diatoma elongatum</i>	✓	✓		sp14	纤细桥弯藻 <i>Cymbella gracillis</i>			✓
sp7	窄异极藻 <i>Gomphonema angustatum</i>	✓		✓	sp15	小头菱形藻 <i>Nitzschia microcephala</i>			✓
sp8	双头菱形藻 <i>Nitzschia amphibia</i>	✓	✓						

2019 年 5、7、9 月额尔齐斯河周丛藻类密度和生物量分别为 8.89×10^8 个/ m^2 和 $3859.71 \text{ mg}/\text{m}^2$ 、 1.64×10^9 个/ m^2 和 $2450.78 \text{ mg}/\text{m}^2$ 、 2.08×10^9 个/ m^2 和 $3859.71 \text{ mg}/\text{m}^2$ 。从图 2 中可以看到,周丛藻类密度总体上 5 月、7 月、9 月呈上升趋势,其中 5 月(平水期)总体密度平均低于 9.0×10^8 个/ m^2 ,9 月(枯水期)总体密度最大,部分样点(6#)甚至到达 7.40×10^9 个/ m^2 。由于各样点水域环境的不同,其周丛藻类密度也存在差异,其中克兰河小东沟平均密度与生物量最高 (5.35×10^9 个/ m^2 和 $4527.70 \text{ mg}/\text{m}^2$),布尔津河口平均密度与生物量最低 (1.67×10^8 个/ m^2 和 $346.07 \text{ mg}/\text{m}^2$)。从时间分布来看,9 月(枯水期) > 7 月(丰水期) > 5 月(平水期)。空间上,额尔齐斯河流域中下游周丛藻类密度与生物量高于上游。

额尔齐斯河周丛藻类 5、7、9 月 Shannon-Wiener 多样性指数 (H')、Margalef 丰富度指数 (D) 和 Pielou 均匀

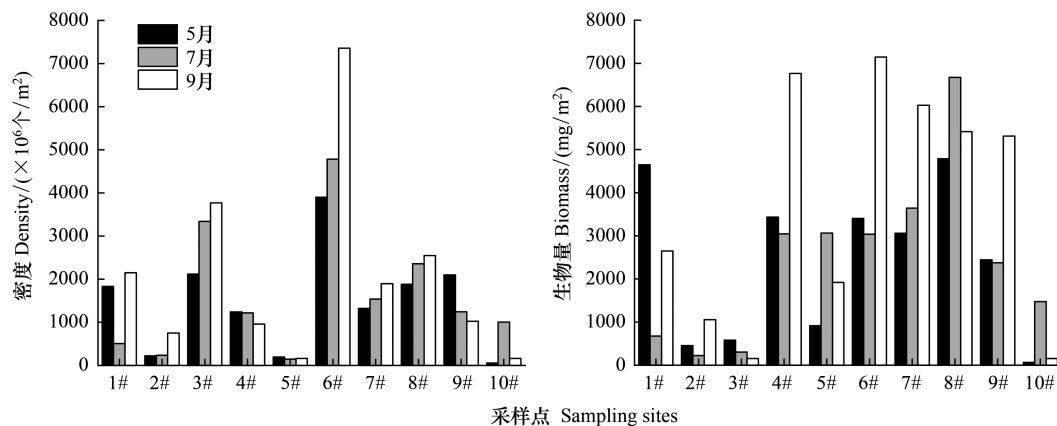


图2 额尔齐斯河周丛藻类密度与生物量

Fig.2 Density and biomass of periphytic algae in the Irtysh River

度指数(J)的平均值分别为 3.52、3.02 和 0.75,变化范围依次为 1.56—4.38、1.78—4.45、0.43—0.88(图 3)。从 3 个指数平均值来看,额尔齐斯河流域整体水质为寡污或无污,但从变化范围和各样点情况来看,大部分样点属于寡污或无污,部分样点(4#、5#、8#)属于 β -中污染。

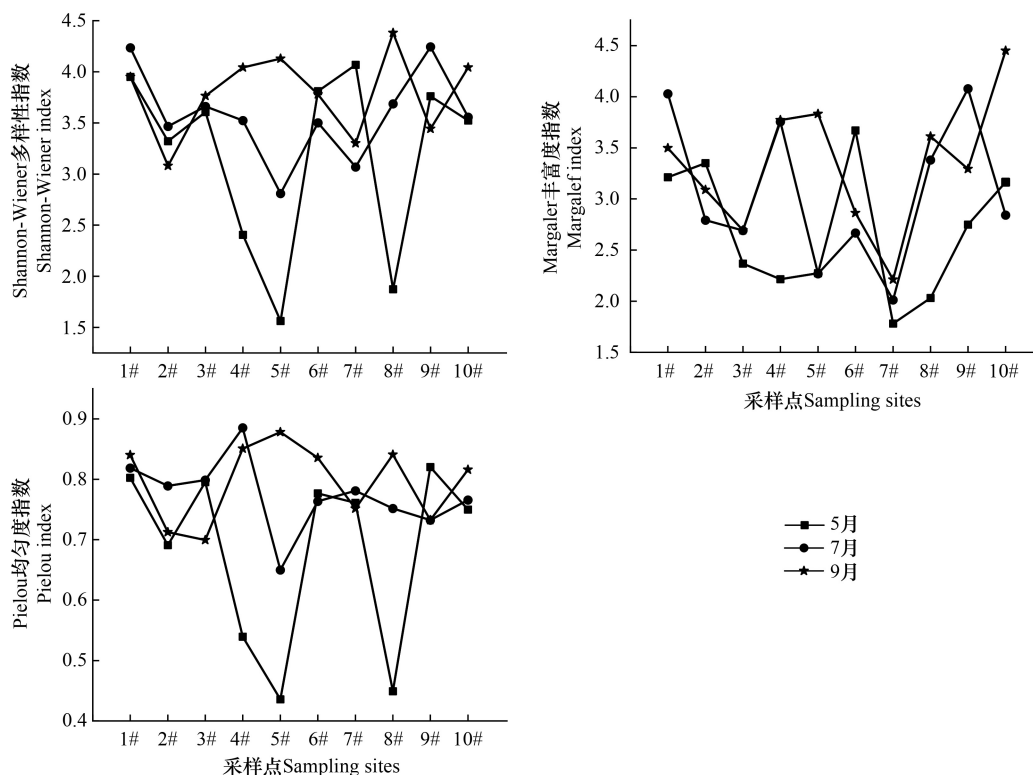


图3 额尔齐斯河周丛藻类多样性指数

Fig.3 Diversity indices of periphytic algae in the Irtysh River

2.2 周丛藻类群落结构与环境因子相关性分析

PCA(图 4)与 PCT 分析结果表明,影响额尔齐斯河水环境的主要环境因子在不同时期略有差异,其中 5 月(平水期)主要有水温、镁、pH、溶解氧、钙镁总量、悬浮物、总氮、硝酸盐氮,7 月(丰水期)主要有钙、氨氮、水

温、氨氮、pH、钙镁总量、悬浮物、高锰酸盐指数,9月(枯水期)主要有水温、总氮、硝酸盐氮、pH、溶解氧、悬浮物、钙镁总量、钙。CCA 分析结果(图 5)表明,5月(平水期)显著影响额尔齐斯河流域群落结构的环境因子为 pH、溶解氧、悬浮物、总氮、硝酸盐氮,7月(丰水期)为水温、氨氮、pH、悬浮物、高锰酸盐指数,9月(枯水期)为总氮、硝酸盐氮、pH、溶解氧、悬浮物。

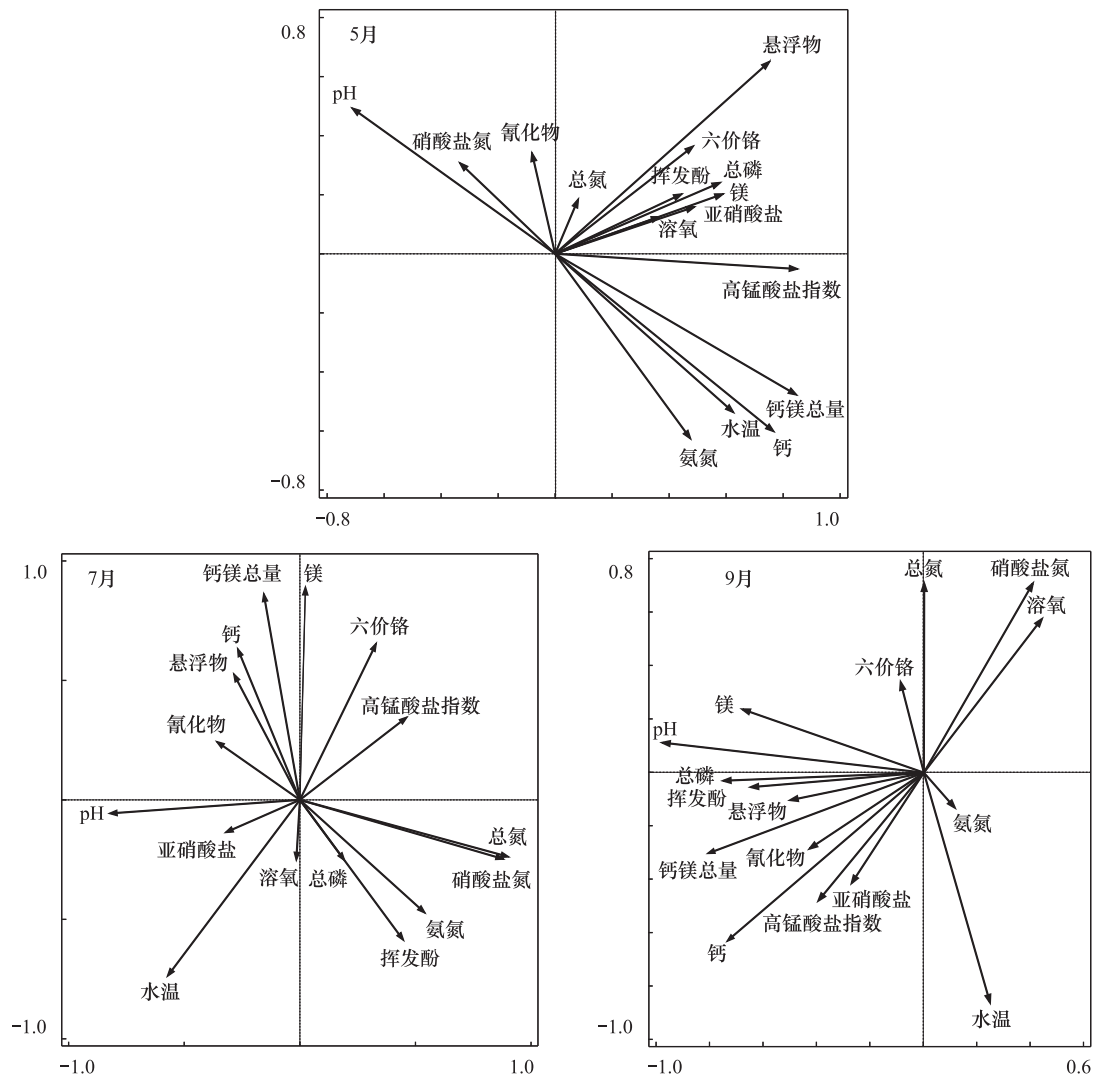


图 4 额尔齐斯河水环境因子的主成分分析 (PCA)

Fig.4 Principal component analysis of environmental factors in the Irtysh River

CCA 分析结果显示(图 5),3 个月份前四个排序轴对累计种类环境因子百分比的解释分别为 97.91%(5月)、99.45%(7月)、99.43%(9月),基本可以反映额尔齐斯河周丛藻类群落与环境因子间的关系。根据藻类密度与环境因子的关系可以看出,由于不同月份周丛藻类物种密度分布存在差异,影响因子亦发生变化。5月(平水期)CCA 排序图第一轴和第二轴的特征值分别为 0.535 和 0.343,物种数据累计变化率的 87.93%在轴 1 和轴 2 中得到解释。平水期优势种在四个象限较为分散,悬浮物对普通等片藻、偏肿桥弯藻密度显著正相关,对扁圆卵形藻有较强的负相关性,溶解氧、硝酸盐氮、高锰酸盐指数对橄榄形异极藻、极小桥弯藻密度有显著影响。其中 pH 和悬浮物对 5 月(平水期)周丛藻类分布有较大影响。7月(丰水期)前两个轴的特征值分别为 0.565 和 0.235,共解释了 80.23%物种数据累计变化,丰水期优势种主要集中在第一象限与高锰酸盐指数和悬浮物显著负相关,与氨氮呈正相关。悬浮物和氨氮对丰水期周丛藻类分布有较大影响。9月(枯水期)

第一轴和第二轴的特征值分别为 0.563 和 0.219, 种类数据累计变化率的 78.18% 被解释, 枯水期悬浮物对扁圆卵形藻、系带舟形藻、窄异极藻影响显著, 偏肿桥弯藻、弯曲桥弯藻与总氮、溶解氧、硝酸盐氮呈正相关。9 月 (枯水期) 影响周丛藻类分布的主要环境因子为悬浮物、溶解氧。

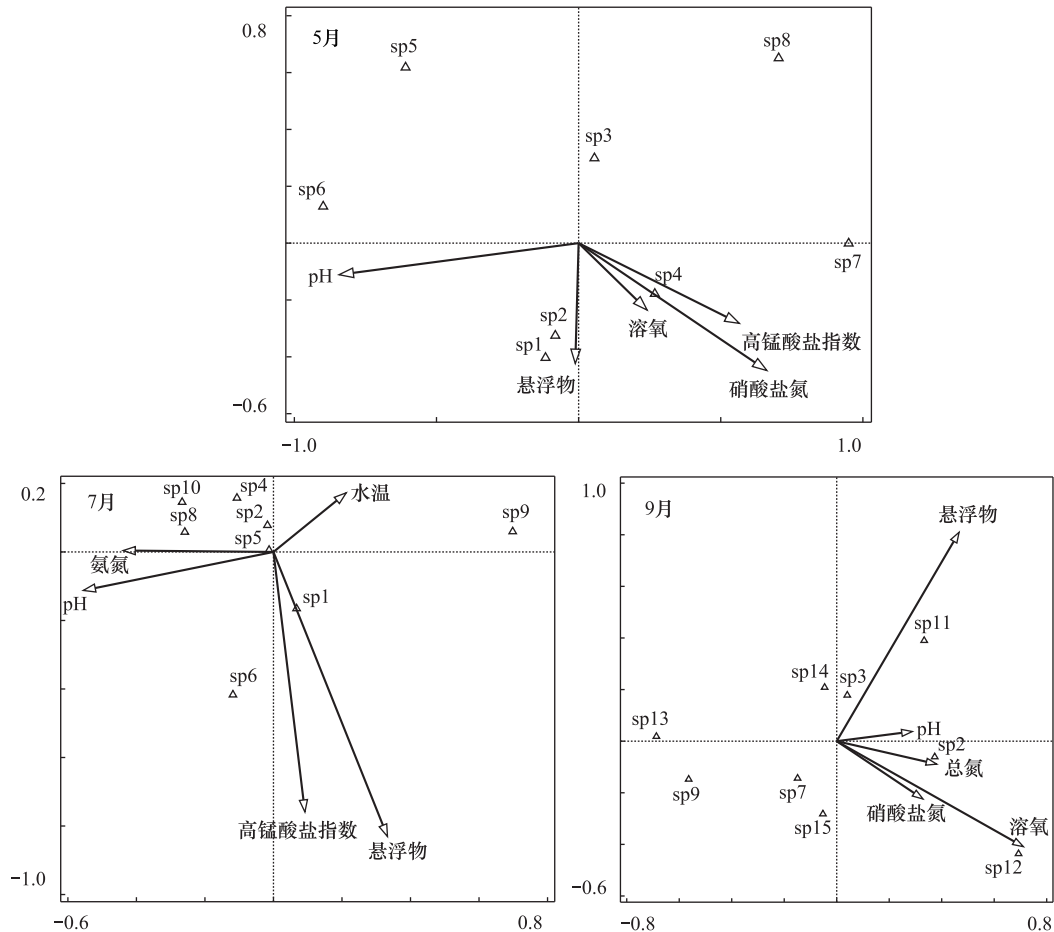


图 5 周丛藻类群落与水环境因子的典范对应分析 (CCA)

Fig.5 Canonical correspondence analysis of periphytic algae community and environmental factors

2.3 额尔齐斯河水生态健康评价结果

通过分布范围检验、判别能力分析以及相关性分析最终筛选出 8 种生物指数作为额尔齐斯河流域的 P-IBI 核心参数。以参照点 P-IBI 的 25% 分位值作为健康阈值, 将低于 25% 分位数的值四等分, 建立 P-IBI 的评价标准 (表 2)。基于各采样点 5 月、7 月、9 月的数据, 参照 P-IBI 的评价标准得出额尔齐斯河健康状况 (表 3)。

结果显示: 5 个采样点位于健康状态, 1 个采样点位于亚健康状态, 3 个采样点为一般状况, 1 个采样点极差。所有样点的 P-IBI 值的变化范围在 0.46—5.35 之间, 平均值为 2.46, 属于评价标准的亚健康范围内, 说明额尔齐斯河流域总体呈亚健康状态。空间分布来看, 支流采样点健康状况优于干流, 大多支流采样点呈健康状态, 而干流采样点健康状况多为一般, 特别是干流 7# 采样点处于极差状态。从月份来看 (表 3) 9 月份总体 P-IBI 分值最高, 7 月份次之, 5 月份最低。

表 2 额尔齐斯河流域的 P-IBI 健康评价标准

Table 2 Criteria of health assessment based on P-IBI in the Irtysh River

健康 Healthy	亚健康 Sub-healthy	一般 Average	差 Relatively poor	极差 Very poor
>2.669	2.002—2.669	1.334—2.002	0.667—1.334	0—0.667

表 3 基于 P-IBI 的额尔齐斯河各采样点不同月份评价结果

Table 3 The P-IBI results of all sampling sites at different months in the Irtysh River

采样点 Site	采样点类型 Site type	采样月份 Month	P-IBI 分值 P-IBI core	评价等级 Evaluation grade	P-IBI 总分 P-IBI gross score	评价等级 Evaluation grade
185 团湾(1#)	受损点	2019 年 5 月	1.5386	一般	1.9364	一般
185 Regiment (1#)		2019 年 7 月	1.4848	一般		
		2019 年 9 月	2.7868	健康		
别列则克(2#)	受损点	2019 年 5 月	1.5253	一般	1.7058	一般
Bieliezeke (2#)		2019 年 7 月	1.6711	一般		
		2019 年 9 月	1.921	一般		
哈巴河(3#)	参照点	2019 年 5 月	3.1996	健康	3.469	健康
Haba River (3#)		2019 年 7 月	2.7052	健康		
		2019 年 9 月	4.5023	健康		
冲乎尔乡(4#)	参照点	2019 年 5 月	1.9318	一般	4.0464	健康
Chonghuer Township (4#)		2019 年 7 月	4.8591	健康		
		2019 年 9 月	5.3484	健康		
布尔津河口(5#)	受损点	2019 年 5 月	1.8618	一般	1.8704	一般
Burqin Estuary (5#)		2019 年 7 月	2.1471	亚健康		
		2019 年 9 月	1.6023	一般		
克兰河小东沟(6#)	参照点	2019 年 5 月	2.6861	健康	2.688	健康
Xiaodong ditch in Kelan River (6#)		2019 年 7 月	2.6172	亚健康		
		2019 年 9 月	2.7606	健康		
盐池(7#)	受损点	2019 年 5 月	0.4668	极差	0.8379	极差
Yanchi (7#)		2019 年 7 月	0.6714	较差		
		2019 年 9 月	2.3091	亚健康		
635 枢纽(8#)	受损点	2019 年 5 月	1.7324	一般	2.1711	亚健康
635 Hub (8#)		2019 年 7 月	1.6035	一般		
		2019 年 9 月	3.1774	健康		
富蕴县(9#)	受损点	2019 年 5 月	3.8342	健康	2.901	健康
Fuyun County (9#)		2019 年 7 月	2.6423	亚健康		
		2019 年 9 月	2.2266	亚健康		
可可托海(10#)	参照点	2019 年 5 月	2.0028	亚健康	2.8473	健康
Keketuohai (10#)		2019 年 7 月	2.6423	亚健康		
		2019 年 9 月	3.4338	健康		

2.4 P-IBI 健康评价结果验证

Mann-Whitney U 非参数检验结果显示,额尔齐斯河参照点与受损点的 P-IBI 值之间存在显著差异($P<0.05$,图 6),表明本研究所构建的 P-IBI 评价体系对于评价额尔齐斯河的水质健康是适用的。

3 讨论

3.1 额尔齐斯河周丛藻类群落结构的时空特征

根据周丛藻类群落结构组成来看硅藻门占据绝对优势,这与李君等^[35—36]学者对于额尔齐斯河周丛藻类的研究结果一致。这是由于额尔齐斯河为欧亚大陆腹地的冷水性河流,所在区域具有高纬度、高寒、流速相对稳定等特征,这些特征有利于硅藻的生长繁殖^[16]。时间变化来看,周丛藻类的平均密度与生物多样性指数均表现为:9 月>7 月>5 月,这与水文的改变和人类活动的干扰具有一定的相关性^[37]。5—7 月份由于自然降水和冰雪融化而形成额尔齐斯河流域的汛期,在此期间流速较高、流量较大,周丛藻类附着生境被淹没,原始生

境的丧失及汛期较快的水流不利于周丛藻类的附着与累积^[38]。此外,当地农业用水率最高可达 95%^[39],农耕灌溉及畜牧用水等农业生产对额尔齐斯河产生较大幅度的人为干扰,周丛藻类群落结构受到影响,导致 5、7 月份周丛藻类密度与生物多样性较 9 月份低。9 月份洪水退去,河流水环境相对稳定,随着水温升高和光照时间增长,周丛藻类在重新裸露的原始生境快速生长繁殖^[35],短时间内重建其群落结构。克兰河小东沟(6#)9 月份的密度与生物量最高(7.36×10^9 个/ m^2 和 $7146.6 \text{ mg}/\text{m}^2$),远高于其他样点,这是由于该地区属于上游山林区域,生境质量较好,水体透明度和溶解氧含量较高,为藻类提供了适宜的生长环境^[40]。受海拔及人类活动的影响,额尔齐斯流域周丛藻类密度与生物量在空间上表现为中下游高于上游。上游地区所处海拔更高,温度较中下游地区更低,这将不利于周丛藻类的生长,其次中下游地区城镇化程度较高,输入河流中的营养盐增加,促进了周丛藻类的生长与繁殖^[41]。

3.2 影响周丛藻类群落结构的环境因素

已有的相关研究表明,水温、溶解氧、营养盐及其他水文因子是影响河流周丛藻类群落长期季节变化的主要因子^[16,42-44]。氮、磷等营养盐对藻类的生长繁殖具有重要影响并且其含量与人类活动密切相关^[45]。布尔津河口(5#)与布尔津县毗邻,受人类活动干扰的影响,氨氮和亚硝酸盐氮等营养盐含量偏高,促使周丛藻类大量繁殖。水体溶解氧和透明度随着藻类的大量增殖而降低,溶解氧直接关系到藻类的光合作用和新陈代谢^[46],因此低溶解氧浓度进一步抑制了硅藻的生长,从而导致布尔津河口周丛藻类物种多样性指数处于较低水平。不同水文期造成的水位波动及流速变化可能导致悬浮物、透明度等发生改变,从而影响额尔齐斯河周丛藻类密度与生物量的空间分布。PCA 和 CCA 分析表明,悬浮物在 7 月份为主要影响因素,这可能是因为 7 月份为丰水期,较高的流速与较大的流量导致水体混浊,悬浮物含量增加降低了水体透明度,藻类的光合作用受到影响,最终导致藻类群落结构及分布的变化^[47]。本研究发现悬浮物不仅受水文因素的影响,也受当地环境的影响,位于铜矿采集区的别列则克(2#),金属及泥沙等悬浮物在此聚集导致水体透明度的下降,因而该区域周丛藻类物种多样性和密度呈现较低水平,这与其它研究^[13,48]中悬浮物对藻类群落结构影响具有相似的趋势。

3.3 额尔齐斯河水生态健康评价

李雪健等^[48-49]学者基于鱼类和大型底栖动物生物完整性指数对额尔齐斯河进行水生态健康评价,尽管与本研究所选指示种不同,但与本研究呈现相似的趋势。一般(不含)等级以上的占比为 60%(表 3),相对于李雪健^[48]对额尔齐斯河 2014—2016 健康评价结果一般(不含)等级所占比重 80%—55% 的下降趋势有所提升,这可能与 2017 年以来新疆生态保护与修护工作的陆续启动有关^[40]。虽然额尔齐斯河水生态健康状况在不同年份有少许波动,但总体来看近几年并未发生较大改变,表明其水生生态系统相对较为稳定。对比基于 P-IBI 和周丛藻类多样性指数的水生态健康评价结果,发现除盐池(7#)存在差异外,其它采样点的健康评价结果均保持一致。其原因可能是多样性指数与物种数有关^[50],物种越多则多样性指数越大,水质评价结果越好。而 P-IBI 则是各个候选参数共同作用的结果,盐池(7#)藻类种(属)较多,但多为污染指示种,候选参数中的硅藻耐污指数偏大,导致基于 P-IBI 的水质健康评价结果较差。

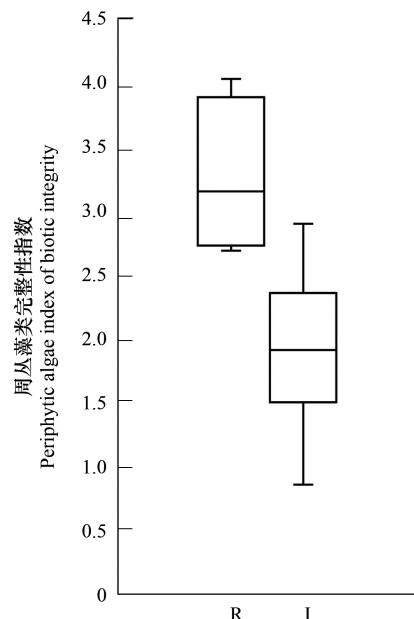


图 6 参照点和受损点 P-IBI 值的比较(R 代表参照点,I 代表受损点)

Fig.6 Comparison of the B-IBI values between the reference and impaired sites (R: reference sites; I: impaired sites)

从空间分布上看,额尔齐斯河上游健康状况优于下游,支流优于干流。人类活动干扰导致周丛藻类群落结构改变,进而影响河流健康状况,这一现象在国内外研究中比较普遍^[51-54]。哈巴河、冲乎尔乡、克兰河小东沟等城镇化较低且植被覆盖率较高的的支流水体处于健康状态。而城镇化程度及土地利用相对较高的185团湾、布尔津河口等干流水体河流健康等级处于一般,说明人类活动在一定程度上影响了它的生态健康状况。由于水工程的建设^[49],干流中游盐池(7#)水生态健康状况为极差。相关研究表明,水工程的建设导致额尔齐斯河水文情势达到中度改变^[15]。水流减缓、泥沙沉积等水文变化对该流域生境产生了严重影响。而已建成多年的635枢纽工程的水质状况为亚健康水平,这可能与河流的自我恢复能力有关。有研究显示,浮游细菌在坝下呈现较低丰度,但在距坝较远距离时,丰度上升并恢复,环境逐渐变好^[55],研究者将其主要归因于河流的自我恢复能力。本研究也有类似情况,下游健康状况明显优于中游盐池的健康状况。由此可见,我们应在河流可承受范围内开发利用,维持河流生态系统的动态平衡。

从时间变化来看,额尔齐斯河5、7、9月份水生态健康水平稍有差异,这可能与周丛藻类在不同水文期群落组成与分布有关。艾雪等^[56]学者应用大型底栖动物完整性指数对松花江流域的水质健康评价中,基于时间尺度的趋势分析显示:水体理化因子发生改变会相应的影响水生生物的群落结构及组成,IBI健康评价结果随之发生改变。额尔齐斯河流域在不同水文期的盐度、水温、溶解氧和流速等理化因子会产生一定的变化,周丛藻类的群落结构及组成会对这些水环境状况的时空变化产生一定程度的响应^[16],最终导致了不同水文期该流域水质健康水平的差异。

参考文献 (References):

- [1] 殷旭旺, 张远, 渠晓东, 刘颖, 李庆南, 孟伟. 浑河水系着生藻类的群落结构与生物完整性. 应用生态学报, 2011, 22(10): 2732-2740.
- [2] Hill B H, Willingham W T, Parrish L P, McFarland B H. Periphyton community responses to elevated metal concentrations in a Rocky Mountain Stream. Hydrobiologia, 2000, 428(1): 161-169.
- [3] Worf D L. Biological Monitoring for Environmental Effects. Lexington: Lexington Books, 1980.
- [4] Vis C, Hudon C, Cattaneo A, Pinel-Alloul B. Periphyton as an indicator of water quality in the St Lawrence River (Québec, Canada). Environmental Pollution, 1998, 101(1): 13-24.
- [5] 杨海明, 殷绍武, 吴朝晖, 李建平. 梅尼小环藻 (*Cyclotella meneghiniana* Kiits) 的培养与利用. 湖南师范大学: 自然科学学报, 1997, 20(3): 56-61.
- [6] Harrison P J, Hu M H, Yang Y P, Lu X. Phosphate limitation in estuarine and coastal waters of China. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 1990, 140(1/2): 79-87.
- [7] 晏妮. 贵州两种类型喀斯特水库浮游植物分布与富营养化特征比较研究[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2006.
- [8] Greenwood J L, Lowe R L. The effects of pH on a periphyton Community in an Acidic Wetland, USA. Hydrobiologia, 2006, 561: 71-82.
- [9] Pizarro H, Vinocur A, Tell G. Periphyton on artificial substrata from three lakes of different trophic status at Hope Bay (Antarctica). Polar Biology, 2002, 25(3): 169-179.
- [10] Fairchild G W, Lowe R L. Artificial substrates which release nutrients: effects on periphyton and invertebrate succession. Hydrobiologia, 1984, 114(1): 29-37.
- [11] Pringle C M, Bowers J A. An in situ substratum fertilization technique: diatom colonization on nutrient-enriched, sand substrata. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 198, 41(8): 1247-1251.
- [12] Barbour M T, Gerritsen J, Snyder B D, Stribling J B. Rapid Bioassessment Protocols Foruse in Streams and Wadable Rivers: Periphyton, Benthic Invertebrates and Fish. Boston: United States Environmental Protection Agency, 1999.
- [13] 殷旭旺, 渠晓东, 李庆南, 刘颖, 张远, 孟伟. 基于着生藻类的太子河流域水生态系统健康评价. 生态学报, 2012, 32(6): 1677-1691.
- [14] 任慕莲, 郭焱, 张人铭, 蔡林刚, 阿达克, 李红, 付雅丽, 刘昆仑. 我国额尔齐斯河鱼类及鱼类区系组成. 干旱区研究, 2002, 19(2): 62-66.
- [15] 姜旭新, 黄婧, 张岩, 李继清. 额尔齐斯河流域河谷生态系统水文情势变化影响分析及生态修复建议. 中国农村水利水电, 2019, (10): 12-16.
- [16] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法(第四版). 北京: 中国环境出版社, 2002.
- [17] 胡鸿钧, 魏印心. 中国淡水藻类: 系统、分类及生态. 北京: 科学出版社, 2006: 27-915.
- [18] Mara D, Horan N J. Handbook of Water and Wastewater Microbiology. Amsterdam: Academic Press, 2003.
- [19] 章宗涉, 黄祥飞. 淡水浮游生物研究方法. 北京: 科学出版社, 1991: 340-344.
- [20] Shannon C E, Weaver W. The Mathematical Theory of Communication. Champaign: University of Illinois Press, 1949: 1-144.
- [21] Pielou E C. Ecological Diversity. New York: John Wiley & Sons, 1975: 1-165.

- [22] Margalef D R. Information theory in ecology. *Gen Syst*, 1957, 3: 36-71.
- [23] Karr J R. Assessment of biotic integrity using fish communities. *Fisheries*, 1981, 6(6): 21-27.
- [24] 盛萧, 黄小追, 徐海升, 邓培雁, 王旭涛. B-IBI 在东江河流健康评估中的应用研究. *华南师范大学学报: 自然科学版*, 2016, 48(2): 52-60.
- [25] Karr J R. Defining and assessing ecological integrity: beyond water quality. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1993, 12(9): 1521-1531.
- [26] 王为木, 蔡旺炜. 生物完整性指数及其在水生态健康评价中的应用进展. *生态与农村环境学报*, 2016, 32(4): 517-524.
- [27] 张方方, 张萌, 刘足根, 陈宏文, 齐述华. 基于底栖生物完整性指数的赣江流域河流健康评价. *水生生物学报*, 2011, 35(6): 963-971.
- [28] 王备新, 杨莲芳, 胡本进, 单林娜. 应用底栖动物完整性指数 B-IBI 评价溪流健康. *生态学报*, 2005, 25(6): 1481-1490.
- [29] 裴雪姣, 牛翠娟, 高欣, 徐琛. 应用鱼类完整性评价体系评价辽河流域健康. *生态学报*, 2010, 30(21): 5736-5746.
- [30] Kane D D, Gordon S I, Munawar M, Charlton M N, Culver D A. The Planktonic Index of Biotic Integrity (P-IBI): an approach for assessing lake ecosystem health. *Ecological Indicators*, 2009, 9(6): 1234-1247.
- [31] Barbour M T, Gerritsen J, Griffith G E, Frydenborg R, McCarron E, White J S, Bastian M L. A framework for biological criteria for Florida streams using benthic macroinvertebrates. *Journal of the North American Benthological Society*, 1996, 15(2): 185-211.
- [32] 段学花, 王兆印, 徐梦珍. 底栖动物与河流生态评价. 北京: 清华大学出版社, 2010.
- [33] Blocksom K A, Kurtenbach J P, Klemm D J, Fulk F A, Cormier S M. Development and evaluation of the Lake Macroinvertebrate Integrity Index (LMII) for new jersey lakes and reservoirs. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2002, 77(3): 311-333.
- [34] Braak C J T, Smilauer P J. CANOCO Reference Manual and User's Guide to Canoco for Windows; Software for Canonical Community Ordination (Version 4). Wageningen; Centre for Biometry, 1998.
- [35] 李君, 周琼, 谢从新, 王军, 韦丽丽. 新疆额尔齐斯河周丛藻类群落结构特征研究. *水生生物学报*, 2014, 38(6): 1033-1039.
- [36] 韦丽丽. 新疆伊犁河与额尔齐斯河周丛藻类群落结构及其水质生物学评价[D]. 武汉: 华中农业大学, 2016.
- [37] 张连鹏, 邓铭江, 黄强. 面向生态的额尔齐斯河水库群中长期调度. *水科学进展*, 2018, 29(3): 365-373.
- [38] 吴乃成, 周淑娟, 傅小城, 蒋万祥, 李凤清, 蔡庆华. 香溪河小水电的梯级开发对浮游藻类的影响. *应用生态学报*, 2007(5): 1093-1098.
- [39] 刘时栋, 刘琳, 张建军, 王柯, 郭义强. 基于生态系统服务能力提升的干旱区生态保护与修复研究——以额尔齐斯河流域生态保护与修复试点工程区为例. *生态学报*, 2019, 39(23): 8998-9007.
- [40] 孙春梅, 范亚文. 黑龙江黑河段水域藻类植物群落结构及其环境相关性的初步分析. *海洋与湖沼*, 2010, 41(1): 126-132.
- [41] 薛浩, 郑丙辉, 孟凡生, 王业耀, 程佩瑄, 叶匡旻. 甘河着生藻类群落结构及其与环境因子的关系. *生态环境学报*, 2020, 29(2): 328-336.
- [42] 代玲玲. 三峡水库富营养化藻类特征及环境因素影响研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2007.
- [43] Biggs B J F. Biomonitoring of organic pollution using periphyton, South Branch, Canterbury, New Zealand. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 1989, 23(2): 263-274.
- [44] Lowe R L. Periphyton Patterns in Lakes//Stevenson R J, Bothwell M L, Lowe R L, eds. *Algal Ecology: Freshwater Benthic Ecosystems*. San Diego: Academic Press, 1996.
- [45] 杨宋琪, 祖廷勋, 王怀斌, 王丽娟, 陈天仁, 王丹霞, 杨生辉, 罗光宏. 黑河张掖段浮游植物群落结构及其与环境因子的关系. *湖泊科学*, 2019, 31(1): 159-170.
- [46] 陈向, 刘静, 何琦, 林秋奇, 韩博平, 韦桂峰. 东江惠州河流段人工基质附着硅藻群落落的季节性动态. *湖泊科学*, 2012, 24(5): 723-731.
- [47] 侯秀富. 水体颗粒物对淡水藻类生长的影响及其反馈作用[D]. 泉州: 华侨大学, 2013.
- [48] 李雪健, 贾佩尧, 牛诚伟, 邢迎春, 李浩林, 刘海波, 唐文乔, 赵亚辉. 新疆阿勒泰地区额尔齐斯河和乌伦古河流域鱼类多样性演变和流域健康评价. *生物多样性*, 2020, 28(4): 422-434.
- [49] 王军, 周琼, 谢从新, 李红, 阿达可白克·可尔江, 蔡林钢. 基于大型底栖动物完整性指数的新疆额尔齐斯河健康评价. *环境科学研究*, 2015, 28(6): 959-966.
- [50] 李开枝, 尹健强, 黄良民, 谭辉辉, 许战洲. 珠江口浮游动物的群落动态及数量变化. *热带海洋学报*, 2005, 24(5): 60-68.
- [51] Walker C E, Pan Y D. Using diatom assemblages to assess urban stream conditions. *Hydrobiologia*, 2006, 561(1): 179-189.
- [52] Stevenson R J, Bothwell M L, Lowe R L. *Algal Ecology: Freshwater Benthic Ecosystems*. San Diego: Academic Press, 1996.
- [53] Leland H V, Porter S D. Distribution of benthic algae in the upper Illinois River basin in relation to geology and land use. *Freshwater Biology*, 2000, 44(2): 279-301.
- [54] 惠秀娟, 杨涛, 李法云, 胡成, 王彤, 徐成斌, 侯伟, 马放. 辽宁省辽河水生态系统健康评价. *应用生态学报*, 2011, 22(1): 181-188.
- [55] Okuku E O, Tole M, Kiteresi L I, Bouillon S. The response of phytoplankton and zooplankton to river damming in three cascading reservoirs of the Tana River, Kenya. *Lakes & Reservoirs: Research & Management*, 2016, 21(2): 114-132.
- [56] 艾雪, 李中宇, 赵然, 阴琨. 松花江流域生物完整性时空变化分析. *环境监测管理和技术*, 2020, 32(4): 34-37.

附表 1 额尔齐斯河流域 P-IBI 候选参数及其环境干扰响应

Supplementary Table 1 Candidate parameters of P-IBI in the Irtysh River basin and their response to environmental disturbance

参数类型 Parameter type	候选参数 Candidate index	对干扰的响应 Response to the disturbance
现存量	密度(N1)	减小
Standing crop	生物量(N2)	增大
硅藻评价参数	硅藻耐污指数 PTI(N3)	减小
Diatom evaluation parameter	硅藻属指数 GDI(N4)	增大
	运动性硅藻百分比(N5)	增大
	敏感性硅藻百分比(N6)	减小
	硅藻商(N7)	增大
	富营养化硅藻指数(N8)	增大
IDP 硅藻指数(N9)		增大
多样性指数	香农-威纳多样性指数(N10)	增大
Diversity index	Simpson 多样性指数(N11)	增大
	Margalef 多样性指数(N12)	增大
	Pielou 均匀度指数(N13)	增大
	物种数(N14)	增大
	属数目(N15)	增大
物种组成参数	硅藻总密度(N21)	减小
Species composition parameter	优势种密度(N22)	减小
	优势种相对丰富度(N23)	减小
	曲壳藻属相对曲壳藻属、舟形藻属总和的百分比(N24)	减小
	桥弯藻属对桥弯藻属、舟形藻属总和的百分比(N25)	减小
	硅藻属的相对丰度(N26)	减小
	硅藻属内物种的相对丰度(N27)	减小
硅藻耐污指数	PH 指数(N28)	增大
(Diatom resistance index)	盐度指数(N29)	增大
	湿度指数(N30)	增大
	氮代谢指数(N31)	增大
	需氧指数(N32)	增大
	腐殖度指数(N33)	增大
	营养状态指数(N34)	增大

附表 2 8 个候选参数的 Pearson 相关分析

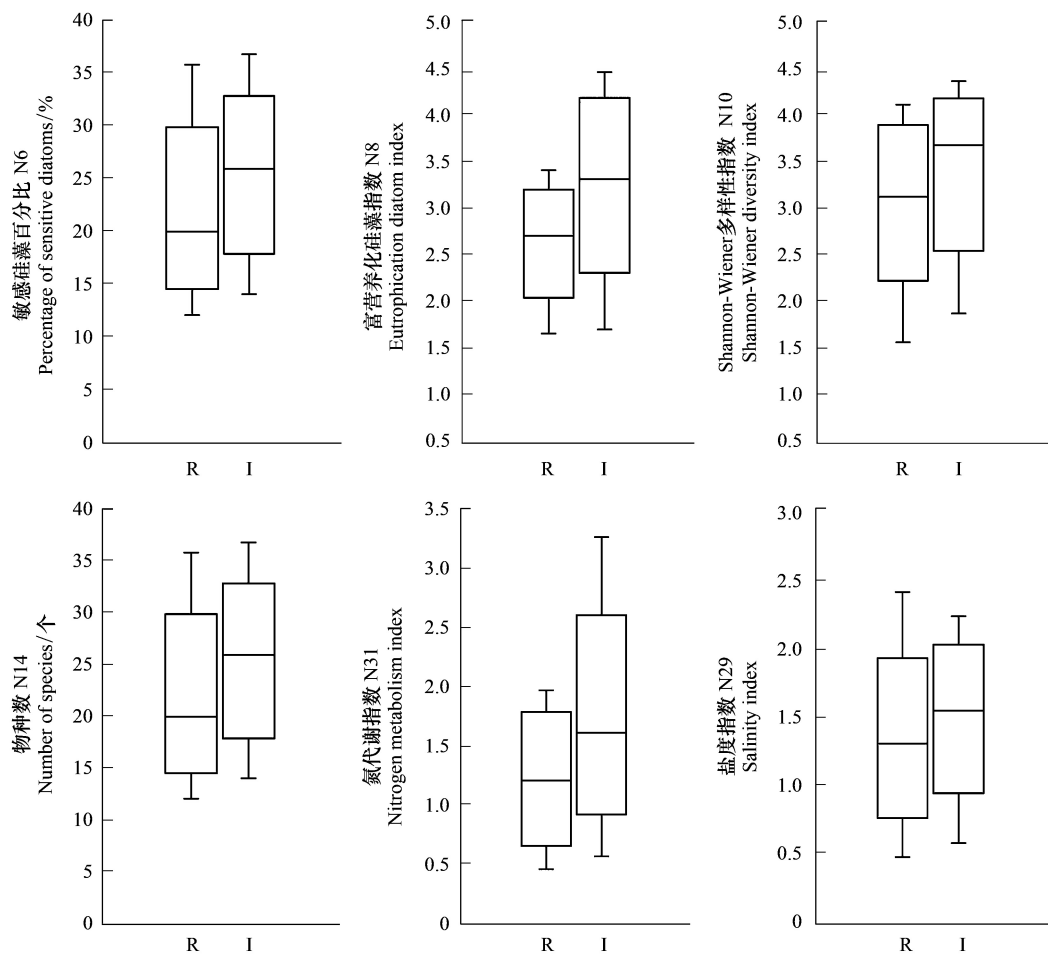
Supplementary Table 2 Pearson correlation analysis of 8 candidate parameters

参数 Metrics	N6	N8	N10	N14	N15	N23	N29	N31
N6	1							
N8	-0.214	1						
N10	-0.136	0.139	1					
N14	0.033	0.119	0.6810 **	1				
N15	-0.095	0.216	0.4550 **	0.8040 **	1			
N23	0.19	-0.078	-0.8480 **	-0.4550 **	-0.302	1		
N29	-0.237	0.6410 **	0.251	0.058	0.218	-0.279	1	
N31	-0.3950 *	0.6140 **	0.3540 *	0.221	0.3640 *	-0.248	0.7250 **	1

* * 表明在 0.01 水平(双尾)的相关性显著; * 表明在 0.05 水平(双尾)的相关性显著

附表 3 通过比值法计算 P-IBI 核心参数的计算公式

Supplementary Table 3 Calculation formula of P-IBI core parameters by ratio scoring method				
参数 Parameter	95%分位数 95% quantile	5%分位数 5% quantile	最大值 Maximum	计算公式 Calculation formula
N6	0.8358	0.1363	1.044	$N6/0.8358$
N8	3.259	1.7971	3.4129	$(3.4129-N8)/(3.4129-1.7971)$
N10	4.0473	2.3737	4.1276	$(4.1276-N10)/(4.0473-2.3737)$
N14	31.5	12	36	$(36.0000-N14)/(31.5000-12.0000)$
N29	1.9486	0.514	2.4076	$(2.4076-N29)/(1.9486-0.5140)$
N31	1.8777	0.5736	1.9708	$(1.9708-N31)/(1.8777-0.5736)$



附图 1 候选参数在参照点与干扰点的分布箱线图(R 代表参照点, I 代表受损点)

Supplementary Fig.1 Distribution boxplot of remaining parameters at reference and impaired sites (R: reference sites; I: impaired sites)