

新疆伊犁河浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系

李晓莉,倪朝辉,彭亮,陶玲,代梨梨,李云峰,李谷

(中国水产科学研究院长江水产研究所,湖北武汉 430223)

摘要:了解伊犁河水域浮游植物群落结构特征及其与水环境因子之间的关系,为伊犁河的水环境评价与保护以及渔业资源的合理开发利用提供参考依据。于 2019 年 6、9、12 月对伊犁河流域的浮游植物进行系统调查,分析伊犁河干流、3 条一级支流、3 条二级支流及 2 个附属水库共 23 个样点的藻类群落结构特征及其与水质因子的关系。共采集到浮游植物 7 门 88 属 141 种,其中硅藻门 70 种(49.65%)、绿藻门 40 种(28.37%)、蓝藻门 17 种(12.06%),裸藻门、金藻门、甲藻门、隐藻门种类较少,分别为 2 种(1.42%)、4 种(2.84%)、3 种(2.13%)和 5 种(3.55%),种类数表现为干流>一级支流>二级支流,水库绿藻门种类多于河流,隐藻门种类只在水库样本中出现。优势种主要为硅藻门的脆杆藻(*Fragilaria* sp.)、小环藻(*Cyclotella* sp.)、针杆藻(*Synedra* sp.)、舟形藻(*Navicula* sp.)、桥弯藻(*Cymbella* sp.)、异极藻(*Gomphonema* sp.),其中脆杆藻为全流域全年优势种。伊犁河浮游植物细胞密度均值为 30.77×10^4 个/L,生物量均值为 0.67 mg/L,季节差异均表现为 9 月>6 月>12 月。Marglef 物种丰富度、Simpson 指数、Shannon-Wiener 指数和 Pielou 均匀度指数分别为 2.86、0.85、2.48 和 0.75。河流样本浮游植物群落结构受海拔、溶氧和总磷的影响较大,水库样本浮游植物受水深、透明度和温度的影响较大。根据多样性指数和藻类丰度,伊犁河水质评价总体为轻度污染。

关键词:浮游植物;种群结构;多样性指数;水质评价;伊犁河

中图分类号:Q178.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2022)06-0059-10

伊犁河是跨越中国和哈萨克斯坦的国际河流,也是新疆最大的一条河流。伊犁河的主源特克斯河发源于天山汗腾格里峰北侧,与支流巩乃斯河汇合后称伊犁河,西流至霍尔果斯河进入哈萨克斯坦境内,最后注入中亚的巴尔喀什湖。伊犁河有大小支流 122 条,流域面积 15.1 万 km²,从河源至入湖口全长 1 236 km,其中中国境内河长 442 km,流域面积 5.6 万 km²。伊犁河水资源丰富,年径流量 158.65×10^8 m³,水能蕴藏量 700 多万 kW,开发条件较好的水利枢纽有 30 多处,蕴藏着巨大的经济价值,同时具有良好生态环境保护功能(王珍,2007;任慕莲等,1998;韦丽丽等,2015)。

浮游植物是河流生态系统中重要的生态类群,因其个体小、细胞结构简单、生命周期短等特点,对栖息环境变化极为敏感,因此浮游植物较其他生物类群而言,其种类组成和分布的变化对生态环境的变化反应更及时(Barbour et al, 1999;吴湘香等,2014)。为进一步了解伊犁河水域浮游植物群落结

构特征及其与水环境因子之间的关系,2019 年 6–12 月,对伊犁河全流域各河段的浮游植物进行全面调查,以期对伊犁河的水环境评价与保护以及渔业资源的合理开发利用提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 调查点位和调查时间

伊犁河流域由伊犁河干流(境内由特克斯河与巩乃斯汇合处至霍尔果斯出境处,约 442 km)、特克斯河、巩乃斯河、喀什河 3 条大型一级支流以及 12 条二级和若干三级支流构成。本次调查范围覆盖伊犁河干流、特克斯河、巩乃斯河和喀什河 3 条重要一级支流,科克苏河、阿合牙孜河和恰甫河 3 条重要二级支流以及位于特克斯河的恰甫其海水库和位于喀什河的温泉电站水库 2 个代表性水库。具体点位设置如表 1 和图 1。

调查选择在鱼类生活史关键时期繁殖期(6 月)、育肥期(9 月)、越冬期(12 月)进行。每个时期的样品采集在 1 周内完成。

1.2 样本采集与测定

浮游植物指标:定量样本用 2.5 L 采水器采集混合水样,装入 1 L 样品瓶中,采集的水样立即用 10 mL 鲁哥氏液固定。水样经 2 次 24 h 沉淀,浓缩至 30~50 mL。定性样本用 25 号浮游生物网在水面划“∞”形捞取,将

收稿日期:2021-05-07 修回日期:2022-11-14

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)。

作者简介:李晓莉,1981 年生,女,副研究员,研究方向为藻类生态学。E-mail: lxl@yfi.ac.cn

通信作者:李谷。E-mail: ligu@yfi.ac.cn

表 1 伊犁河流域调查点位布设

Tab.1 Information on the sampling sites in the Yili River

水域名称	水体类型	序号	站位	经纬度(E/N)/°	海拔/m
特克斯河	一级支流	1 区	土克土	80.9581/42.9493	1642
		2 区	阔布村	81.7599/43.1544	1244
		3 区	龙口	82.4885/43.4224	865
伊犁河	干流	4 区	巩留	82.2622/43.6011	762
		5 区	雅玛渡	81.8209/43.6257	697
		6 区	伊犁	81.0922/43.9043	577
		7 区	爱新色里	80.6672/43.8407	540
喀什河	一级支流	8 区	纪念碑	84.2917/43.6620	2244
		9 区	阿克塔斯	83.7554/43.7095	1830
		10 区	温泉电站坝下	83.2806/43.7669	1511
		11 区	英阿瓦提	81.9172/43.8099	812
巩乃斯河	一级支流	12 区	巩乃斯沟乡	81.5611/43.2685	1906
		13 区	沙哈吾特克勒	83.7280/43.4170	1085
		14 区	畜牧大队	82.5820/43.5646	798
科克苏河	二级支流	15 区	阔克苏	81.9104/43.1797	1082
阿合牙孜河	二级支流	16 区	喀夏加尔	81.0880/42.8614	1723
恰普河	二级支流	17 区	库尔干村	83.2539/43.4106	960
特克斯河——恰甫其海水库	附属水库	K1 区库尾(K1U)	/	82.370743.2342	992
		K1 区中游(K1M)	/	82.4487/43.2420	990
		K1 区坝前(K1D)	/	82.5028/43.3337	985
喀什河——温泉水库	附属水库	K2 区库尾(K2U)	/	82.1606/43.8503	954
		K2 区中游(K2M)	/	82.0956/43.8464	945
		K2 区坝前(K2D)	/	82.0681/43.8373	932

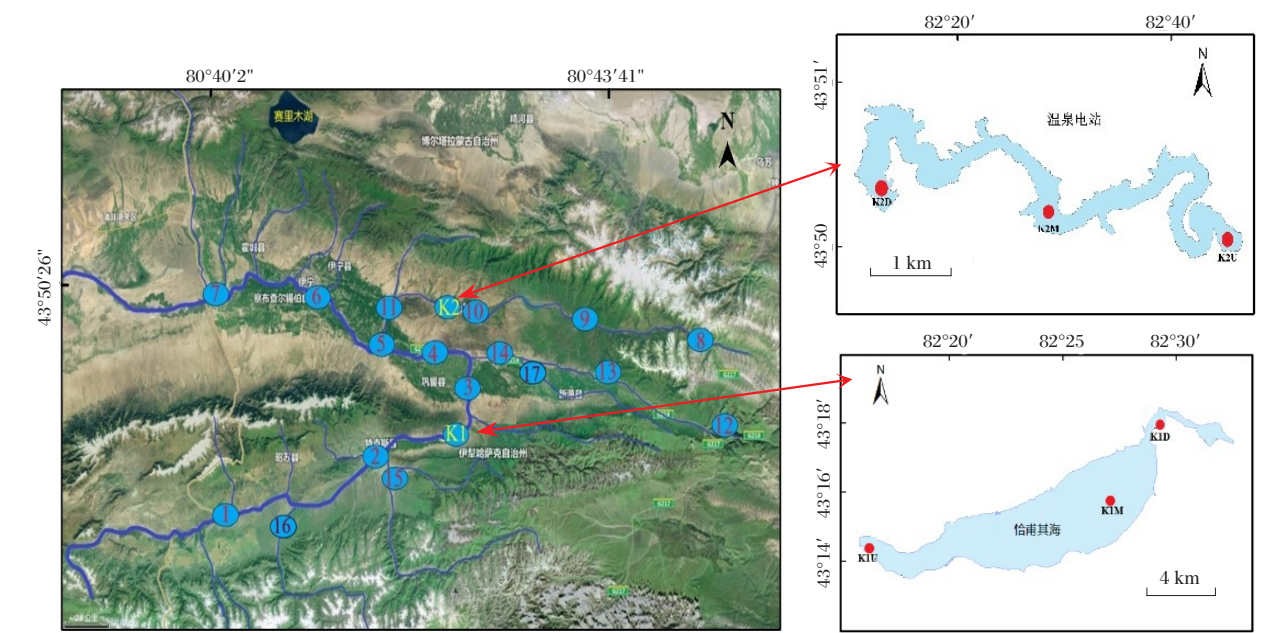


图 1 伊犁河流域及采样位置示意

Fig.1 Yili River basin and locations of sampling sites

过滤后留存的样品放入标本瓶,加10%甲醛保存。浮游植物定量计数在10×40倍显微镜视野下采用迅数R100软件进行,每个样本计数2次,每次计数在200个视野。浮游植物的鉴定主要参照胡鸿钧等(1979)的《中国淡水藻类》,浮游植物生物量的估算及优势种大小测量方法参考相关资料(章宗涉和黄祥飞,1991;金相灿和屠清英,1990;中华人民共和国农业部,2010)。

水环境指标测定:水温、溶解氧、pH、电导率采用哈希HQ40D便携式水质多参数仪现场测定,透明度采用黑白板圆盘法,TN、TP、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、COD_{Mn}、叶绿素a等在水样采集后带回实验室分析,各项水质指标的测定方法均按《水和废水监测分析方法》(国家环境保护局,2002)进行。

1.3 分析方法

1.3.1 多样性分析 采用Shannon-Wiener指数(H')、Simpson指数(D)、丰富度指数(d)、均匀度指数(J)进行分析(Shannon & Weaver, 1949; Marglef, 1958; Pielou, 1975)。

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

$$D=1-\text{SUM}[N_i(N_i-1)/N(N-1)]$$

①

②

$$d=(S-1)/\log_2N$$

$$J=H'/\log_2S$$

③

④

式中: N_i 为第*i*种的个体数, N 为所有种类总个体数, S 为物种数。

1.3.2 优势种的确定 根据每个种类的优势度值(Y)来确定。

$$Y=(N_i/N)\times F_i$$

⑤

式中: N_i 为第*i*种的个体数, N 为所有种类总个体数, F_i 为第*i*种出现的频率。 Y 值大于0.01的种类定为全年调查的优势种。

1.3.3 统计分析 数据统计学分析使用SPSS 19.0软件,采用PCA分析探讨伊犁河浮游植物与环境因子的关系,PCA分析在CANOCA5.0软件中完成。

2 结果与分析

2.1 种类组成

调查共鉴定出浮游植物7门88属141种,见表2。其中硅藻门最多,共70种,占比49.65%,其次是绿藻门40种,占比28.37%,再次是蓝藻门17种,占比12.06%,裸藻门、金藻门、甲藻门、隐藻门种类较少,分别为2、4、3和5种,合计占比不到10%。

表2 伊犁河浮游植物各门类属(种)数及占总数的百分比
Tab.2 Phytoplankton phylum composition and percentages of total species number in each surveyed area of Yili River basin

河流	硅藻门	蓝藻门	绿藻门	裸藻门	甲藻门	金藻门	隐藻门	合计
特克斯河	47(69.12%)	9(13.24%)	6(8.82%)	2(2.94%)	4(5.88%)	/	/	68
伊犁河干流	36(46.75%)	15(19.48%)	20(25.97%)	2(2.60%)	4(5.19%)	/	/	77
喀什河	43(61.43%)	7(10.00%)	16(22.86%)	2(2.86%)	2(2.86%)	/	/	70
巩乃斯河	54(68.35%)	13(16.46%)	10(12.66%)	1(1.27%)	1(1.27%)	/	/	79
科克苏河	30(69.78%)	5(11.63%)	5(11.63%)	1(2.33%)	1(2.33%)	1(2.33%)	/	43
阿合牙孜河	27(84.38%)	2(6.25%)	2(6.25%)	/	1(3.13%)	/	/	32
恰普河	28(75.68%)	5(13.51%)	2(5.41%)	1(2.70%)	1(2.70%)	/	/	37
恰甫其海水库	34(48.57%)	8(11.43%)	15(21.43%)	1(1.43%)	4(5.71%)	3(4.29%)	5(7.14%)	70
温泉电站水库	32(47.06%)	6(8.82%)	19(27.94%)	1(1.47%)	4(5.88%)	2(2.94%)	4(5.88%)	68

注:“/”表示未检出种。
Note: / means undetectable species.

特克斯河段(干流河源)藻类共68种,由于各支流水体的加入,伊犁河干流段藻类增加至77种,与特克斯河相比,蓝藻门、绿藻门种类增加,硅藻门种类减少。支流方面,巩乃斯河种类最多,共79种,其次是喀什河,共70种,3条二级支流(科克苏河、阿合牙孜河及恰普河)种类较少,分别是43、32和37种,明显低于3条一级支流和干流。恰甫其海水库和温泉电站水库分别是70种和68种,与所属河流种类数相

近,水库的绿藻门种类明显多于河流,隐藻门只在水库样本中出现。

从季节变化上来看(图2),伊犁河浮游植物种类数随季节的变化因河流而异。特克斯河、喀什河及巩乃斯河上游表现为6月种类数多于9月和12月,且随水流方向种类数逐渐减少;干流以及巩乃斯河口则是9月>12月>6月,3条二级支流和2个水库均是12月份种类数最少。

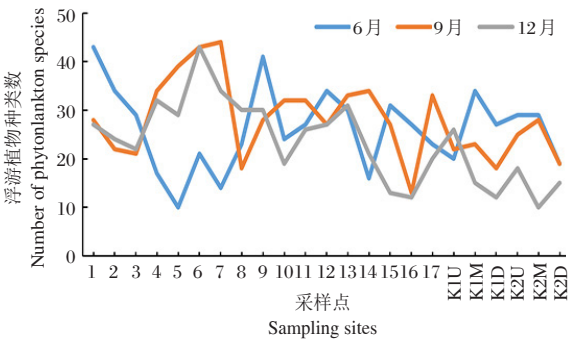


图2 伊犁河浮游藻类种类数的季节变化

Fig. 2 Seasonal and spatial variation of planktonic algae species in Yili River

2.2 优势种

伊犁河浮游植物优势种如表3。3次采样均为优势种的有硅藻门的脆杆藻(*Fragilaria* sp.)、小环藻(*Cyclotella* sp.)、针杆藻(*Synedra* sp.)、舟形藻(*Navicula* sp.)、桥弯藻(*Cymbella* sp.)、异极藻(*Gomphonema* sp.)。脆杆藻、等片藻(*Diatoma* sp.)和异极藻为全流域的优势种,金杯藻仅为恰布其海水库中的优势种。脆杆藻为全流域全年的优势种。优势种中硅藻门占比最高,范围为71.00%~86.96%,最大占比出现在12月份。

表3 伊犁河浮游植物优势种

Tab.3 Dominant phytoplankton species and corresponding dominance

门类	优势种	优势度		
		6月	9月	12月
Bacillariophyta	脆杆藻 <i>Fragilaria</i> sp.	0.08	0.30	0.06
	小环藻 <i>Cyclotella</i> sp.	0.03	0.13	0.11
	针杆藻 <i>Synedra</i> sp.	0.04	0.02	0.04
	舟形藻 <i>Navicula</i> sp.	0.07	0.04	0.04
	桥弯藻 <i>Cymbella</i> sp.	0.07	0.03	0.03
	异极藻 <i>Gomphonema</i> sp.	0.06	0.03	0.05
	美丽星杆藻 <i>Asterionella formosa</i>	/	/	0.07
	卵形藻 <i>Cocconeis</i> sp.	0.01	/	0.01
	曲壳藻 <i>Achnanthes</i> sp.	/	/	0.01
	羽纹藻 <i>Pinnularia</i> sp.	0.02	/	/
	菱形藻 <i>Nitzschia</i> sp.	0.01	/	/
	等片藻 <i>Diatoma</i> sp.	/	/	0.04
Cyanophyta	普通等片藻 <i>Diatoma vulgare</i>	/	/	0.07
	长等片藻 <i>Diatoma elongatum</i>	/	/	0.05
	螺旋鞘丝藻 <i>Lyngbya contorta</i>	0.02	/	/
	颤藻 <i>Oscillatoria</i> sp.	0.03	/	/
	鞘丝藻 <i>Lyngbya</i> sp.	0.03	0.02	/
	伪鱼腥藻 <i>Pseudoanabaena</i> sp.	/	0.01	/
Chlorophyta	小球藻 <i>Chlorella</i> sp.	0.01	/	/

2.3 伊犁河浮游植物细胞密度

伊犁河浮游植物细胞密度如图3。其变化范围为 $1.25\times10^4\sim209.58\times10^4$ 个/L,年均值为 30.77×10^4 个/L。6、9、12月的均值分别为 30.76×10^4 、 66.51×10^4 、 26.22×10^4 个/L,季节变化表现为9月>6月>12月。空间分布特征方面,6月份硅藻门和蓝藻门的数量占绝对优势,合计占比在95%以上(除干流河段外)。9月份蓝藻门和硅藻门仍占绝对优势,但在干流河段和巩乃斯河中游绿藻门的数量较6月份时显著上升。12月份硅藻门的数量占绝对优势,占比超过90%。

恰甫其海水库和温泉电站水库浮游植物细胞密度均值分别为 42.99×10^4 、 232.82×10^4 个/L,均表现为9月>6月>12月。恰甫其海水库6月份浮游藻类数量上中下游差异较大,分别为 6.05×10^4 、 23.44×10^4 、 34.5×10^4 个/L,且随着水体深度增加数量逐渐减少。物种组成方面,绿藻门和硅藻门比重较大,在75%以上。9月份和12月份硅藻门占绝对优势。温泉电站水库6月份上中下游差异显著,分别为 29.42×10^4 、 361.25×10^4 、 196.20×10^4 个/L,上游<下游<中游。物种组成方面,水库上游藻类数量较少,各门分布较均匀,绿藻门、硅藻门蓝藻门占比分别为38.81%、31.45%和22.38%,在水库中游和下游,绿藻门的数量占比达80%以上。9月份上游和下游差异变小,密度分别为 31.92×10^4 个/L和 179.5×10^4 个/L,硅藻门占绝对优势,在97%以上。12月份从上游至下游浮游植物细胞密度逐渐降低,硅藻门的数量占比近100%。温泉电站水库浮游植物数量和物种组成季节差异显著。

2.4 伊犁河浮游植物生物量

伊犁河浮游植物生物量变化如图4。其变化范围为0.03~5.13 mg/L,年平均为0.67 mg/L,变化趋势与密度变化基本一致。6月份生物量的范围是0.03~2.32 mg/L,干流段生物量整体处于较低水平,范围为0.03~0.17 mg/L;支流的生物量均高于干流河段。从物种组成上看,硅藻门占绝对优势,均在80%以上。9月份生物量的范围为0.03~5.13 mg/L,干流生物量较高,范围为0.81~1.85 mg/L,特克斯河、喀什河和巩乃斯河总体随水流方向逐渐升高(除巩乃斯河中游外),范围为0.03~3.24 mg/L,喀什河生物量最低。科克苏河和阿合牙孜河生物量均较低,分别为0.30 mg/L和0.03 mg/L,在物种组成上,硅藻门仍占绝对优势,基本在80%以上。12月份生物量的范围为0.03~1.86 mg/L,整体处于较低水平。干流生物量较高,范围为0.44~1.86 mg/L,特克斯河、喀什河和巩乃斯河喀什河段生物量较低,范围为0.03~0.69 mg/L,3条二级支流均较低,范围为

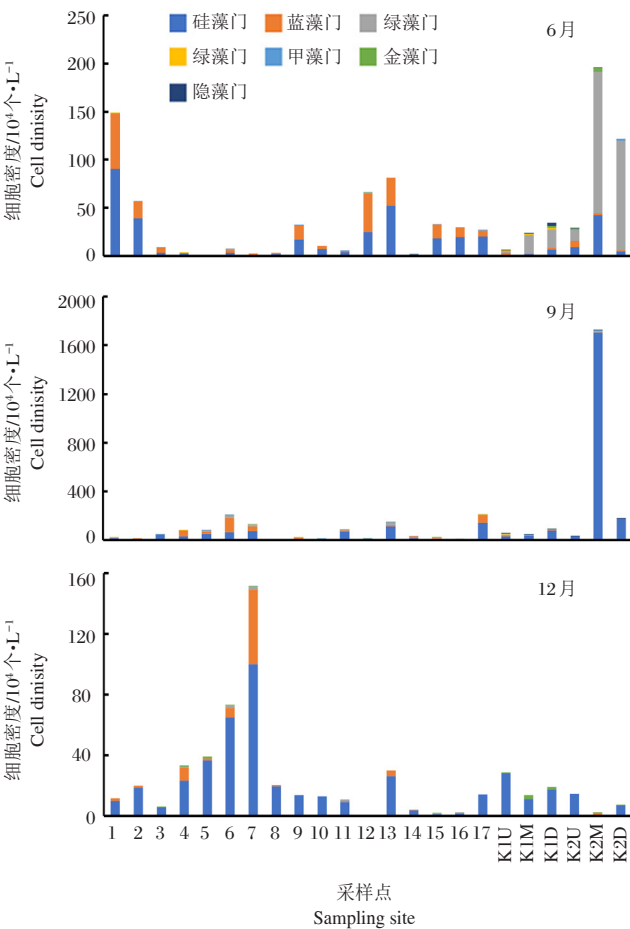


图3 伊犁河浮游植物细胞密度

Fig. 3 Seasonal and spatial variation of phytoplankton cell density in Yili River

0.03~0.04 mg/L。物种组成上,硅藻门占绝对优势,均在99%以上。恰甫其海水库和温泉电站水库浮游植物生物量均值分别为和0.92 mg/L和1.02 mg/L,均表现为9月>6月>12月,其变化趋势与密度基本一致。

2.5 伊犁河浮游植物多样性指数

伊犁河浮游植物多样性指数如图5。物种丰富度(*d*)、Simpson 指数(*D*)、Shannon–Wiener 指数(*H'*)和均匀度指数(*J*)年均值分别为2.86、0.85、2.48和0.75,6月、9月和12月的上述多样性指数均值分别为3.22、0.85、2.47、0.76,3.33、0.84、2.49、0.73和2.04、0.86、2.48、0.77。物种丰富度指数季节差异较大,12月显著低于6月和9月,其余多样性指数季节差异不大。空间分布方面,6月伊犁河干流段的物种丰富度指数显著低于其他河段,伊犁河干流段、巩乃斯河河源以及阿合牙孜河口口处的多样性指数显著较低,9月特克斯河口点位、喀什河中游点位以及阿合牙孜河口口点位的多样性指数较低,12月特克斯河河口点位的多样性指数较低。

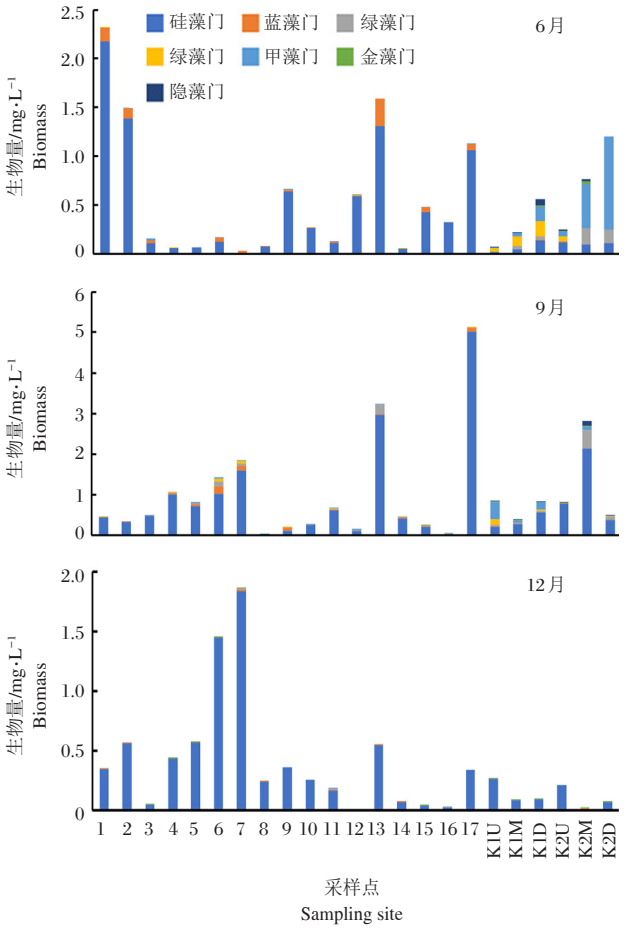


图4 伊犁河浮游植物生物量

Fig. 4 Seasonal and spatial variation of phytoplankton biomass in Yili River

恰甫其海水库和温泉电站水库浮游植物多样性指数均值分别为2.41、0.56、1.55、0.56和1.28、0.66、1.82、0.73,除物种丰富度指数12月份最低外,其他多样性指数均表现为9月<12月<6月,多样性指数季节差异显著。恰甫其海水库中部和下游多样性指数显著低于上游。温泉电站水库中部多样性指数显著低于上游和下游。

2.6 伊犁河浮游植物与环境因子的关系

伊犁河流域主要环境和水质指标如表4和图6,对主要河流和水库的化学指标方差分析结果表明,伊犁河流域的水环境指标存在较显著的时间和空间变化。为了解伊犁河流域浮游植物对环境因子的响应,通过KMO检验选择各藻门的数量以及浮游植物总数量、总生物量、总物种数和优势种指标,并与主要水环境指标(海拔、水温、水深、透明度、DO、pH、TN、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、COD_{Mn})进行PCA分析(图7)。结果显示,用于分析的71个样方数据被分为2组,第1组1~35号样本,主要位于第3象限,受海拔、溶氧和总磷的影响较大,第2组36~71号样本,主要位于第1

象限,受水深、透明度、温度的影响较大。硅藻门的数量与总数量和生物量相关性显著,且与海拔呈负相关。绿藻门、金藻门和甲藻门的数量相关性显著。绿藻门的小球藻、球囊藻以及硅藻门的脆杆藻与总氮、氨氮、硝酸盐氮相关性显著,与总磷和电导率负相关;硅藻门的舟形藻、桥弯藻、异极藻与海拔相关性显著,小环藻与温度和水深相关性大;蓝藻门的鞘丝藻和颤藻与海拔和溶氧相关性大。

3 讨论

3.1 环境因子对伊犁河浮游藻类特征的影响

浮游植物群落的种类组成和数量结构的动态变化受水温、光照、水动力和营养盐等理化参数的影响

(Naselli-Flores, 2000; Du et al, 2019)。本调查中上述环境因子的影响也再次得到了验证,分析发现影响伊犁河流域藻类特征的环境因子主要有温度、光照、营养盐含量以及水文特征等几个因子。

温度是影响浮游植物群落结构季节变化的主要环境因子之一(赵巧华等, 2018)。本研究在新疆伊犁河的 107 个样本中共鉴定出浮游植物 7 门 88 属 141 种,其中硅藻门的种类数最多,所占比例为 46.06%~84.38%,优势种中也是硅藻门种类占绝对优势,最大占比出现在 12 月。这是由伊犁河的气候特点决定的,伊犁河属寒温带半干旱的大陆性气候,夏季短,冬季长;春季升温快但不稳定,调查期间 6~10 月,平均水温为 16.0℃,12 月份只有 1.3℃。研究发现,20℃

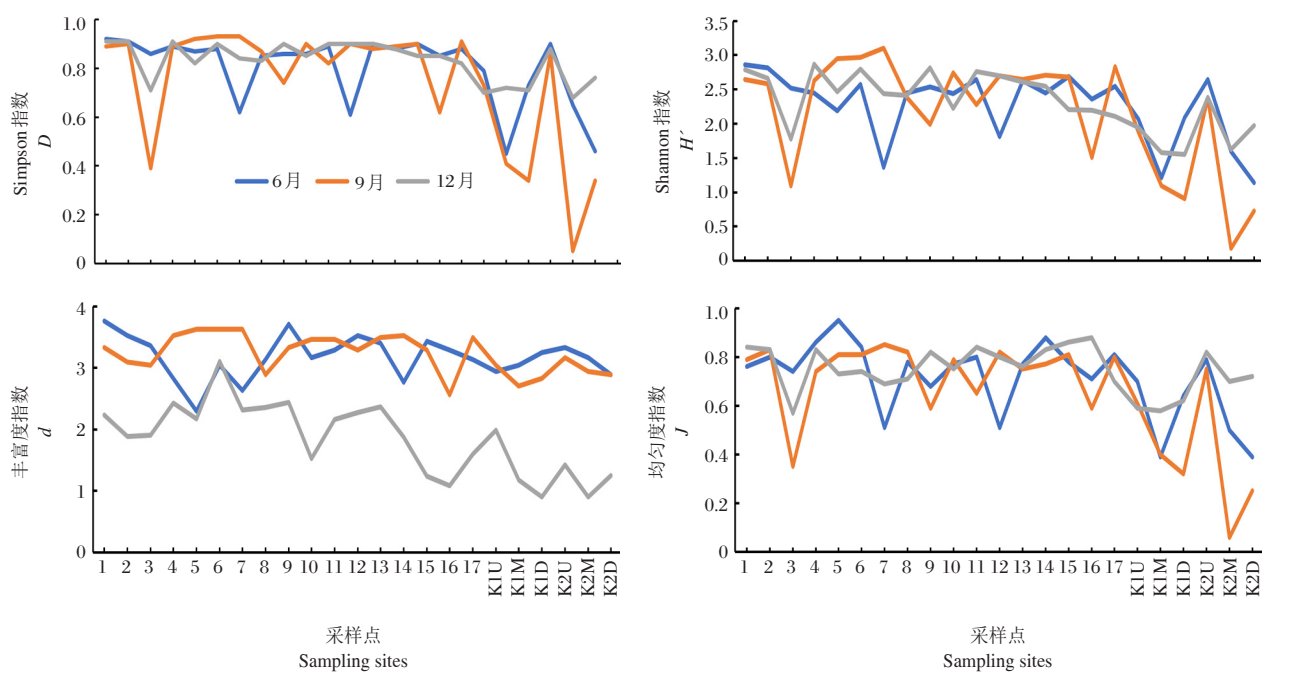


图 5 伊犁河浮游植物多样性指数

Fig. 5 Seasonal and spatial variation of phytoplankton diversity indices in Yili River

表 4 伊犁河主要水质物理指标

Tab. 4 Physical water quality parameters in Yili River

水域名称	水温/℃	DO/mg·L ⁻¹	pH	透明度/cm	水深/m	电导率/μs·m ⁻¹
特克斯河	0.5~19.4	0.83~13.36	8.06~8.35	20~150	0.5~3.0	228~384
伊犁河	0.4~23.9	7.73~13.58	7.52~8.30	15~150	0.5~3.0	318~1655
喀什河	0.5~17.0	8.69~13.33	7.78~8.18	30~150	0.5~2.5	113.8~429
巩乃斯河	0~11.6	7.90~13.33	7.77~8.11	15~100	0.5~3.5	157~55
恰普河	0.6~13.2	9.21~12.64	8.24~6.54	12~100	0.7~3.0	227~525
科克苏河	0~13.4	8.96~12.43	8.15~7.71	20~110	0.2~2.0	236~343
阿合牙孜河	0.3~13.0	9.21~13.30	8.24~8.48	40~100	0.2~1.0	260~424
恰甫其海水库	0.3~22.0	8.11~12.69	7.90~8.44	50~100	10.0~70.0	271~434
温泉电站水库	0.9~23.0	6.80~12.24	7.44~8.57	110~250	10.0~70.0	275~315

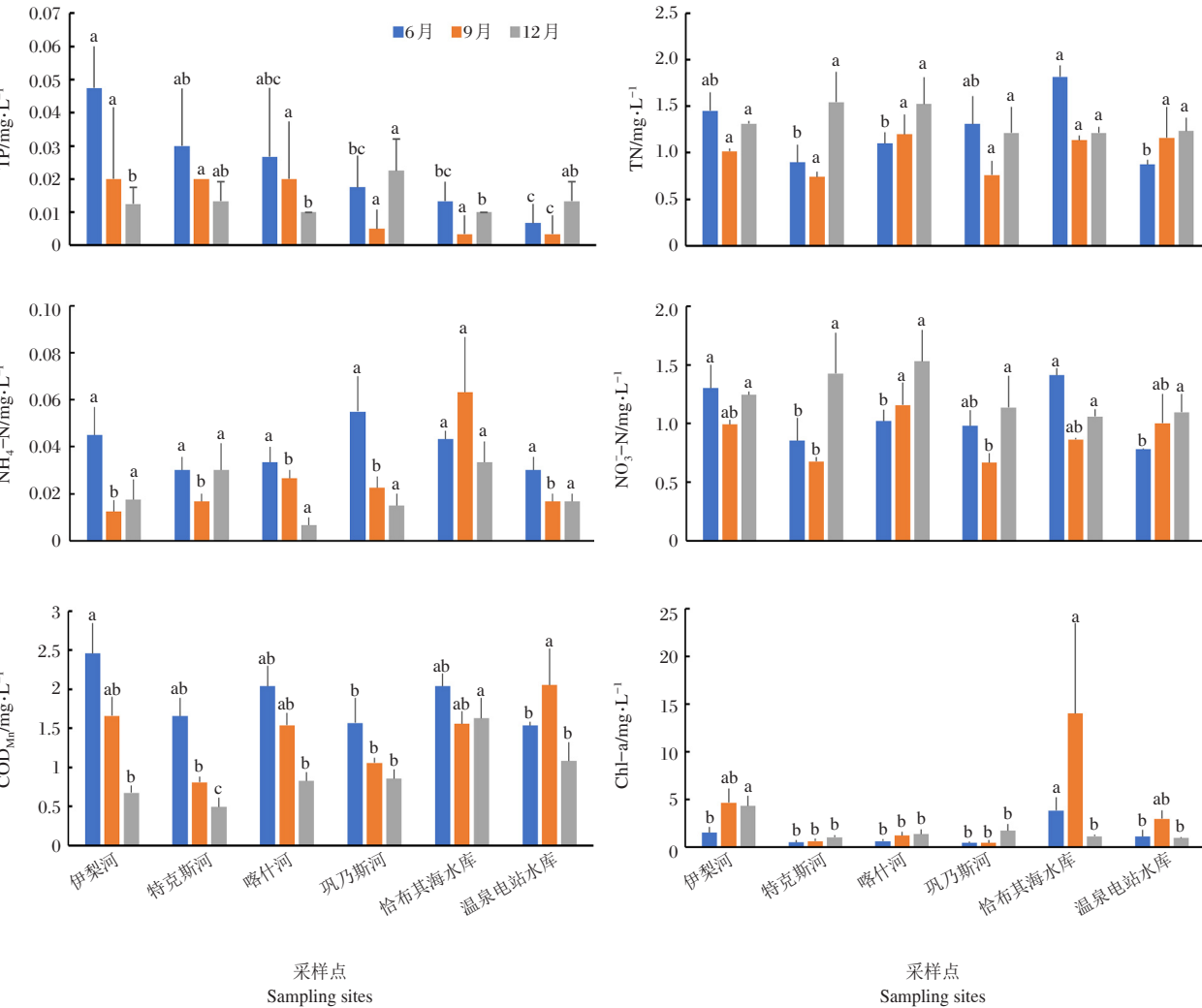


图6 伊犁河主要水质化学指标
Fig. 6 Chemical water quality parameters in Yili River

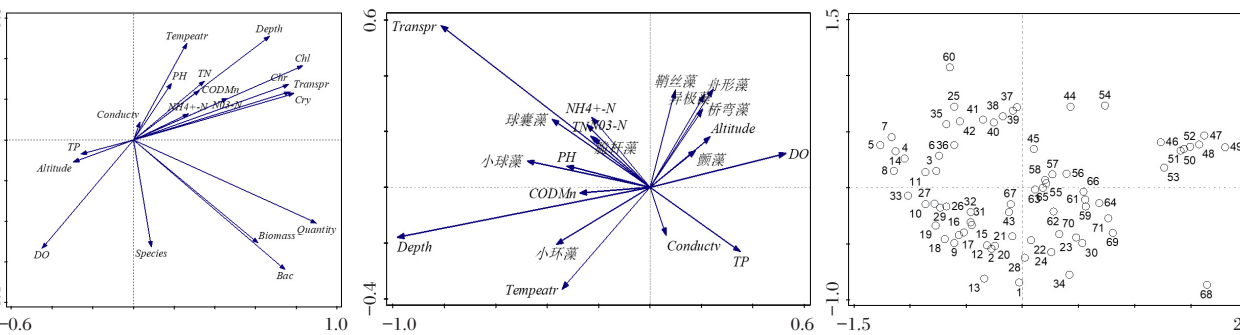


图7 伊犁河浮游植物物种-环境关系的PCA二维排序
Fig.7 PCA biplot of phytoplankton species and environmental variables in Yili River

左右时水体中以硅藻为主,30℃以绿藻为主,40℃以蓝藻为主(王志红等,2005)。因此伊犁河浮游藻类群落是以硅藻为优势的类群,另外,12月的物种丰富度显著低于6月和9月也充分说明温度对浮游植物种类的影响。水库绿藻门的种类数明显多于河流,绿藻门的小球藻和并联藻在6、9月水库样本中是主要优势种,这与新疆其他部分淡水小型水库类似,均属绿藻-硅藻型水库(马得草等,2018;吴惠仙等,2010)。呈现此

特征主要与水库的营养盐含量有关,本研究中9月份恰甫其海水库中游总氮含量为1.82 mg/L,显著高于其他水域。Blinn(1993)的研究早就表明可通过控制水体中的各类营养物的溶解度、离解度或分解率等理化过程间接影响藻类的生长。王东波等(2019)的研究也表明氮、磷是蓝、绿藻主要的环境影响因素,这与本研究结果一致。磷是所有藻类生长所必须的营养物质,也是浮游植物生长的首要限制因子之一(叶金梅等,2020)。薛浩等(2020)发现影响甘河下游硅藻群落结构变化的主要水环境因子为电导率和总磷,雷瑾等(2019)研究得出总磷是影响白洋淀超微真核藻空间分布的关键因子之一,本研究PCA分析中也发现伊犁河河流浮游植物样本与总磷密切相关。

在浮游植物细胞密度和生物量的季节变化和空间分布特征方面,影响因素主要为温度、光照、营养盐以及水体泥沙含量。9月浮游植物细胞密度和生物量最高,其次是6月和12月,季节差异显著,这是由于9月时新疆日照时间较长(李定枝,1999),同时9月份的温度升高,温度和光照均有利于藻类的生长繁殖。浮游植物数量的空间分布特征因河段不同而存在显著差异:在干流段,6月份随水流方向逐渐降低,这与6月份是伊犁河的汛期有关(程其畴,1986),干流段泥沙含量大,透明度高,导致浮游植物不能很好生长,所以6月份伊犁河段的物种丰富度指数也显著低于其他河段,刘黎等(2019)研究得出透明度是影响三峡水库干流底栖硅藻群落组成的主要环境因子之一,这与本文研究结果一致。本研究中河流和水库浮游植物样品在物种-环境PCA分析中得到较好地区分,河流样本受海拔、溶氧和总磷的影响较大,水库样本受水深、透明度以及是温度、pH、总氮、硝酸盐氮的影响较大,表明河流和水库的环境特征存在明显的差异并对浮游植物群落结构造成了显著影响。

3.2 伊犁河藻类特征对水质变化的指示作用

大量研究已证明,藻类群落特征,如生物量和种类组成等能对水质变化做出响应,从而可作为评价河流受污染程度和受人类活动干扰程度的重要生物监测指标(Biggs, 1989; 李君等, 2014)。9月份温泉水库的生物量最高(2.81 mg/L), 远远高于其他干流和支流,说明人类活动(如水库养殖等)干扰程度较大,导致水库水体N、P含量高,藻类大量繁殖。调查中也表明温泉电站水库存在网箱养殖的情况,这与浮游植物的特征相吻合。喀什河段整年采样中浮游植物密度均较低,这与喀什河段海拔高、水温低、营养

盐含量较低的特征相吻合。巩乃斯河段和恰甫河河口9月份生物量显著高于其他河段,与这两河段营养盐含量较高有关。

物种多样性是衡量一定区域内生物资源丰富程度的客观指标,多样性指数可用于评价群落中物种组成的稳定程度、数量分布的均匀程度以及群落的结构特征,也是反映水体营养状况信息的重要参数(吴湘香等, 2014; 孙志强等, 2013)。6月份伊犁河段、巩乃斯河河源处的多样性指数较低与种类少、数量低的结果相符,9月和12月特克斯河源处多样性指数较低与该点位温度较低有关,恰甫其海水库中部和下游多样性指数显著低于上游,温泉电站水库中部多样性指数显著低于上游和下游,与上述点位的水质指标相一致。

沈韞芬等(1990)提出多样性指数和均匀度指数越大、水质越好的理论,藻类多样性指数值越小,说明水质污染程度越严重(王新华等, 2004)。基于黄祥飞(2000)对群落多样性指数值划分水体污染程度的判定标准,本研究中除伊犁河7号站位、阿合牙孜河河口、特克斯河河口等处为季节性中度污染外,伊犁河总体为轻度污染,这与韦丽丽(2015)的研究基本一致。恰甫其海水库为轻中度污染水体,9月份中下游污染加剧。温泉电站水库上游为轻度或无污染水体,中下游为中度污染水体,9月份中游尤其明显。本研究还发现同一条河流中不同河段的污染状况存在不同,如巩乃斯河中游的浮游植物数量和生物量比河源和河口区都高,一方面说明旅游开发河段水质健康状况呈现出退化趋势,这与于帅等(2017)的研究结果较一致;另一方面说明水体自身的物质转化作用能够去除污染物,对水体起到了修复的作用。

3.3 养殖对水体水质及藻类的影响

本调查中,温泉电站水库中游浮游植物数量9月份时显著高于上游和下游水域,这与温泉水库中游存在网箱养殖鲢鳙鱼类有关。鱼类饲料中只有25%~35%被水产动物所吸收(叶元土等, 2001),更多未被摄食的饲料流入水体中,加上鱼类排泄物,这些物质中均含有丰富的氮、磷等营养元素,它们促进了水体浮游植物的生长发育(陈燕琴, 2015)。林永泰等(1995)在研究中发现网箱区浮游植物数量和生物量均比对照区高,蓝于倩等(2015)在研究网箱养殖对水体浮游生物的影响时发现虽然养殖区和非养殖区生物群落结构基本相同但网箱养殖对浮游生物量有较大的影响。温泉水库水体交换量大,所以通过水体自净能力能够消除污染,到水库下游浮游植物

数量迅速减少,养殖尚未对水质造成严重污染。今后随着温泉水库网箱养殖的进行,水域生态环境及水生生物的生存环境势必发生变化,因此有必要长期做好养殖水体环境监测,为温泉电站水库网箱养殖的可持续发展提供科学依据。

参考文献

- 陈燕琴, 2015. 龙羊峡水库网箱养殖区浮游植物调查[J]. 青海农林科技, 2: 24–29.
- 程其畴, 1986. 伊犁地区河流水文特性[J]. 水文, (1): 51–55.
- 国家环境保护局, 2002. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京: 中国环境科学出版社.
- 胡鸿钧, 李尧英, 魏印心, 等, 1979. 中国淡水藻类[M]. 上海: 科学技术出版社.
- 黄祥飞, 2000. 湖泊生态调查观测与分析[M]. 北京: 中国标准出版社.
- 金相灿, 屠清英, 1990. 湖泊富营养化调查规范[M]. 北京: 中国环境科学出版社: 286–302.
- 蓝于倩, 袁一文, 彭亮, 等, 2015. 江谷水库鱼类网箱养殖富营养化及浮游植物功能群的指示作用[J]. 生态环境学报, 24(6): 1028–1036.
- 雷瑾, 史小丽, 张民, 等, 2019. 白洋淀超微真核藻的空间分布特征及关键影响因子[J]. 湖泊科学, 31(6): 1559–1569.
- 李定枝, 1999. 额尔齐斯河流域水文特性[J]. 水文, (3): 54–56.
- 李君, 周琼, 谢从新, 等, 2014. 新疆额尔齐斯河周丛藻类群落结构特征研究[J]. 水生生物学报, 38(6): 1033–1039.
- 林永泰, 张庆, 杨汉运, 等, 1995. 黑龙潭水库网箱养鱼对水环境的影响[J]. 水利渔业, (6): 6–10.
- 刘黎, 贺新宇, 付君珂, 等, 2019. 三峡水库干流底栖硅藻群落组成及其与环境因子的关系(三峡水库蓄水期)[J]. 环境科学, 40(8): 3577–3587.
- 马得草, 胡文革, 张映东, 等, 2018. 大泉沟水库浮游植物群落特征及其与环境因子的关系[J]. 水生态学杂志, 39(5): 47–54.
- 任慕莲, 郭焱, 张清礼, 等, 1998. 伊犁河鱼类资源及渔业[M]. 哈尔滨: 黑龙江科学技术出版社.
- 沈韞芬, 顾曼如, 龚循矩, 等, 1990. 微型动物监测新技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社.
- 孙志强, 施心路, 徐琳琳, 等, 2013. 景观湿地夏季原动物群落结构与水质关系[J]. 水生生物学报, 37(2): 290–299.
- 王东波, 君珊, 陈丽, 等, 2019. 冰封期呼伦湖浮游藻类群落结构及其与水环境因子的关系[J]. 中国环境监测, 35(4): 59–66.
- 王新华, 纪炳纯, 李明德, 等, 2004. 引滦工程上游浮游植物及其水质评价[J]. 环境科学研究, 17(4): 18–24.
- 王珍, 2007. 伊犁河流域水资源开发利用问题研究[J]. 伊犁师范学院学报(社会科学版), (3): 48–51.
- 王志红, 崔福义, 安全, 2005. 水温与营养值对水库藻华态势的影响[J]. 生态环境, 14(1): 10–15.
- 韦丽丽, 周琼, 谢从新, 等, 2015. 新疆伊犁河周丛藻类群落结构及其水质生物学评价[J]. 水生态学杂志, 36(6): 29–38.
- 吴惠仙, 王琼, 蔡桢, 等, 2010. 新疆吉木乃红山水库浮游植物研究[J]. 水生态学杂志, 31(4): 50–54.
- 吴湘香, 李云峰, 沈子伟, 等, 2014. 赤水河浮游植物群落结构特征及其与水环境因子的关系[J]. 中国水产科学, 21(2): 312–320.
- 薛浩, 郑丙辉, 孟凡生, 等, 2020. 甘河着生藻类群落结构及其与环境因子的关系[J]. 生态环境学报, 29(2): 328–336.
- 叶金梅, 赵莉, 罗旭, 等, 2020. 拟柱孢藻生长及碱性磷酸酶活性对不同磷浓度和磷形态响应的株系间差异[J]. 环境科学, 14(9): 4088–4094.
- 叶元土, 林仕梅, 罗莉, 等, 2001. 水产养殖的饲料损失量及原因分析[J]. 内陆水产, (8): 17–18.
- 于帅, 贾娜尔·阿汗, 张振兴, 等, 2017. 新疆伊犁河大型底栖动物群落及水质生物评价[J]. 应用与环境生物学报, 23(4): 728–733.
- 赵巧华, 孙国栋, 王健健, 等, 2018. 水温、光能对春季太湖藻类生长的耦合影响[J]. 湖泊科学, 30(2): 385–393.
- 章宗涉, 黄祥飞, 1991. 淡水浮游生物研究方法[M]. 北京: 科学出版社.
- 中华人民共和国农业部, 2010. SC/T 0402–2010 淡水浮游生物调查技术规范[S]. 北京: 中国标准化出版社.
- Biggs B J F, 1989. Biomonitoring of organic pollution using periphyton, South Branch, Canterbury; New Zealand [J]. Journal of Marine and Freshwater Research, 23: 263–274.
- Blinn D W, 1993. Diatom community structure along physico-chemical gradients in saline lakes[J]. Ecology, 74(4): 1246–1263.
- Du H B, Chen Z N, Mao G Z, et al, 2019. Evaluation of eutrophication in freshwater lakes: A new non-equilibrium statistical approach[J]. Ecological Indicators, 102: 686–692.
- Marglef R, 1958. Information theory in ecology [J]. International Journal of General Systems, 3: 36–71.
- Naselli-Flores L, 2000. Phytoplankton assemblages in twenty-one Sicilian reservoirs: relationship between species composition and environmental factors[J]. Hydrobiologia, 424: 1–11.
- Pielou E C, 1975. Ecological Diversity [M]. New York: Wiley.
- Shannon C E, Weaver W, 1949. The Mathematical Theory of Communication[M]. Berkeley: University of California Press.

Phytoplankton Community Structure and Its Relationship with Environmental Factors in Yili River of Xinjiang Uygur Autonomous Region

LI Xiao-Li, NI Zhao-Hui, PENG Liang, TAO Ling, DAI Li-li, LI Yun-Feng, LI Gu

(Yangtze River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuhan 430223, P.R. China)

Abstract: Characterizing the phytoplankton community structure is an important part of assessing the ecological environment. In this study, we conducted a systematic investigation of phytoplankton community structure in the Yili River basin, focusing on species composition, dominant species, spatial and temporal distribution, and community biodiversity. Physicochemical parameters of water in the basin were monitored as part of the investigation. The relationship of phytoplankton and water environmental parameters was analyzed and the water quality in Yili River was evaluated based on the phytoplankton biodiversity index and biomass. The aim of the study was to provide a reference for evaluating and conserving the aquatic environment and the rational utilization of the fishery resource. Yili River is the largest river in Xinjiang Uygur Autonomous Region, and an international river that spans China and Kazakhstan. The Yili River basin in China includes the Tekes River, Gongnais River, Kashi River and other smaller tributaries. In June, September and December of 2019, a phytoplankton investigation was carried out at 23 sampling sites in the Yili River basin, representing the mainstream, primary tributaries and reservoirs. A total of 141 phytoplankton species were collected, representing 88 genera and 7 phyla, with absolute dominance by Bacillariophyta (70 species, 49.65%), followed by Chlorophyta (40 species, 28.37%), Cyanophyta (17 species, 12.06%), Cryptophyta (5 species, 3.55%), Chrysophyta (4 species, 2.84%), Dinophyta (3 species, 2.13%) and Euglenophyta (2 species, 1.42%). Species richness was highest in the mainstream of Yili River, followed by the primary tributaries and secondary tributaries. The number of Chlorophyta species in reservoirs was significantly higher than in rivers, and Cryptophyta were only observed in reservoir samples. *Fragilaria* sp., *Cyclotella* sp., *Synedra* sp., *Navicula* sp., *Cymbella* sp. and *Gomphonema* sp. (Bacillariophyta) were the dominant species, and *Fragilaria* sp. dominated the entire river basin in all seasons. The average phytoplankton cell density and biomass in Yili River were 30.77×10^4 cells/L and 0.67 mg/L, and the seasonal variation of both followed the order, September > June > December at all sites. Average values of phytoplankton community diversity indices were as follows: Margalef richness ($d=2.86$), Simpson diversity ($D=0.85$), Shannon–Wiener diversity ($H'=2.48$), and Pielou evenness ($J=0.75$). The river phytoplankton community was greatly affected by altitude, dissolved oxygen (DO) and total phosphorus (TP), and the reservoir community was greatly affected by water depth, transparency, and temperature. Based on the community diversity indices and phytoplankton abundance, water quality in Yili River is classified as lightly polluted.

Key words: phytoplankton; community structure; diversity index; water quality evaluation; Yili River