

二滩水库浮游植物群落结构特征及水环境因子的季节变化^{*}

李 锋¹, 曾如奎², 刘小帅², 姚维志¹, 付 梅¹, 熊 波¹, 何 滔¹, 苏胜齐¹

(1. 西南大学 水产学院 渔业资源与环境研究中心, 重庆 400715; 2. 雅砻江流域水电开发有限公司, 成都 610056)

摘要:【目的】考察二滩水库的浮游植物群落结构特征和水环境因子的季节变化。【方法】于2018年12月—2019年10月调查分析了二滩水库5个断面的10个水环境因子和浮游植物的密度、生物量、优势种、Shannon-Wiener多样性指数(H)与Pielous均匀性指数(J)。【结果】二滩水库在调查期间整体上处于中营养状态。共检出浮游植物8门124种,绿藻门(Chlorophyta)和硅藻门(Bacillariophyta)为优势门类,分别有49和43种浮游植物。浮游植物密度及生物量范围分别为 $0.31 \times 10^6 \sim 1.34 \times 10^6$ 个 $\cdot L^{-1}$ 、 $0.43 \sim 1.91$ mg $\cdot L^{-1}$,秋季的浮游植物密度最高,夏季的浮游植物生物量最高。 H 分布范围为2.21~3.96, J 分布范围为0.70~0.93,浮游植物多样性较好,由此判断二滩水库整体处于无污染或轻污染状态。浮游植物密度与总氮含量(TN)呈统计学意义上的正相关关系($p < 0.05$),与高锰酸盐指数(PI)在 $p < 0.01$ 水平上呈统计学意义上的正相关关系; H 与水温(WT)呈正相关关系,在 $p < 0.01$ 水平上具有统计学意义; J 与PI在 $p < 0.01$ 水平上呈统计学意义上的负相关关系。【结论】二滩水库水质良好,浮游植物群落稳定,TN、WT和PI是影响浮游植物群落的主要环境因子。

关键词:二滩水库;水环境因子;浮游植物;Pearson相关性分析

中图分类号:S932.7;X171.1

文献标志码:A

文章编号:1672-6693(2021)03-0050-12

众多河道型水库因江河上大量水利设施的修建而形成,河流的自然流态特征也随之发生变化,水域生态环境也因此受到了巨大的影响^[1-3]。在利用水利设施促进人类社会生产活动的同时,管理者们在相关研究者的协助下要不断开发和优化水质监测技术,增强水库管理能力,确保水库良好的水质状况,避免水库水质状况下降与水生生态遭到破坏。浮游植物是水生生态系统中重要的一部分,在物质循环、能量流动和信息传递的过程中都起到了重要的作用^[4-5]。水环境因子的变化与浮游植物状况有着密切的联系,其中水体理化性质的剧烈变化会影响河流生态环境,进而改变浮游植物的群落结构^[6]。近些年来,人们越来越关注水库水环境因子浮游植物的季节变化以及两者之间的相关性。已有研究者在赤水河^[7]、卧龙湖^[8]、四明湖^[9]、巢湖^[10]等水域进行了调查,他们发现:在不同季节,对浮游植物群落有重要影响的环境因子并不相同;在不同水域,影响浮游植物群落结构的主要环境因子也不相同。位于雅砻江下游的二滩水库是雅砻江流域梯级开发最早的水库,它的水环境状况受上游河段已建或在建水库影响较大,然而当前对二滩水库水环境因子和浮游植物的周年变化及两者相关性的研究较为少见,因此深入探究其中内在规律和机制、尽快进行长期深入的调查分析十分重要。为此本研究以实地调查所得的有关数据为基础,分析了二滩水库的浮游植物群落结构特征和水环境因子年季变化,以便为该水库的水生态环境管理与水生生物资源保护措施的制定提供基础资料。

1 研究方法

1.1 采样点设置与采样时间

分别于2018年12月(冬季)和2019年3月(春季)、7月(夏季)、10月(秋季)选择天气晴朗且水文变化稳定时进行采样。在二滩水库设置了5个采样断面,并根据采样段面的宽度适当采集江心及靠近左右两岸4~5 m处水样。采样断面布置情况见图1,其中ET-3位于支流上,其余采样断面都位于干流上。

1.2 样品采集与分析

水样和浮游植物的采集方法以及水样有关指标的检测均按照文献^[11-12]进行。在采样断面下方0.5 m处

^{*} 收稿日期:2020-09-28 修回日期:2020-11-24 网络出版时间:2021-05-20 10:34

资助项目:雅砻江流域开发公司研发项目(No. YLDC-ZBA-2018089);国家自然科学基金(No. 31472311)

第一作者简介:李锋,男,研究方向为渔业资源与环境,E-mail:757782330@qq.com;通信作者:苏胜齐,男,教授,博士,E-mail:sushengqi@swu.edu.cn

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1165.n.20210519.1533.016.html

采集到水样。对 10 个水环境因子进行检测,其中水温(WT)、溶解氧含量(DO)、电导率(CT)和 pH 都采用哈希水质分析仪器(上海)有限公司提供的 HACH SL1000 便携式多参数分析仪来进行测量;总氮含量(TN)、总磷含量(TP)、高锰酸盐指数(PI)、亚硝态氮(NN)、叶绿素 a(Chla)和硬度(HG)的测定是将水样采集并带回实验室后再进行测定。浮游植物的种类鉴定按照文献[13-14]来进行。

1.3 数据处理

对不同季节的水环境因子数据用“平均值±标准误”表示,并采用 SPSS 22.0 软件对数据进行单因素方差分析,用 LSD 法对不同季节的某一水环境因子数据差异进行比较,当 $p < 0.05$ 时,有关差异视为具有统计学意义。

运用综合营养状态指数(TLI)^[15]对二滩水库富营养化状况进行评价,具体公式为:

$$X_{TLI} = \sum (W_j X_{TLI(j)})。$$

式中: X_{TLI} 为 TLI, $X_{TLI(j)}$ 代表第 j 种参数的营养状态参数, W_j 为第 j 种参数的营养状态指数的相关权重。

浮游植物密度按照文献[16]来计算,具体公式为:

$$D = \frac{V_2 n}{V_1 V}。$$

式中: D 为单位体积水体中浮游植物总数,即浮游植物密度(单位:个·L⁻¹), n 为镜检计数的浮游植物细胞数(单位:个), V_2 为样品浓缩后用于定量分析的体积(单位:mL), V_1 为定量分析的实际样品的体积(单位:mL), V 为采样总体积(单位:L)。

浮游植物的生物量采用体积法来换算,用形状近似的几何体积公式来计算藻类体积^[17]。

浮游植物的优势度(Y)按照文献[17]进行计算,为:

$$Y = P_i f_i。$$

式中: f_i 为第 i 个物种在某一断面中出现的频率; P_i 为第 i 个物种在某一断面中的个体数与所有物种总个体数的比值。当 $Y \geq 0.02$ 时,所对应的物种为优势种。

Shannon-Wiener 多样性指数(H)和 Pielous 均匀性指数(J)均按照文献[16]进行计算,分别为:

$$H = - \sum_{i=1}^S \left(\frac{n_i}{N} \right) \cdot \log_2 \left(\frac{n_i}{N} \right), J = \frac{H}{\log_2 S}。$$

式中: N 为总个体数, n_i 为 i 种的总个体数; S 表示所采集样品中全部物种的种类数量。

采用 Pearson 相关性分析检验水环境因子与浮游植物群落结构参数的相关性。

2 结果

2.1 水环境因子和 TLI

图 2 显示:1) 二滩水库的夏秋两季水温明显高于冬春两季水温,且 ET-3 断面整个四季的水温高于其他 4 个断面同期的水温;2) 水体 pH 偏碱性且在秋季最高,和其他季节的水体 pH 相比差异均有统计学意义($p < 0.05$);3) 所有断面水体的 DO 值在冬季高于春季,差异均具有统计学意义($p < 0.05$);4) 在冬季,水体 CT 值明显较在其他季节更低,差异均具有统计学意义($p < 0.05$);5) 多数情况下水体中 TP 和 Chla 在秋季明显高于在其他季节,差异均具有统计学意义($p < 0.05$),但两个指标在其他季节间的差异无统计学意义;6) 夏季水体的 NN 在高于其他季节水体的 NN,差异均具有统计学意义($p < 0.05$),而其他季节水体 NN 的差异无统计学意义;7) 在同一季节中,ET-3 断面的 TN 均高于其他断面的 TN;8) 多数情况下 PI 和 HG 在各季节间存在统计学意义上的差异($p < 0.05$),其中各季节按 PI 由大到小排列依次为秋季、夏季、春季;按 HG 由大到小排列依次为春季、冬季、夏季、秋季。

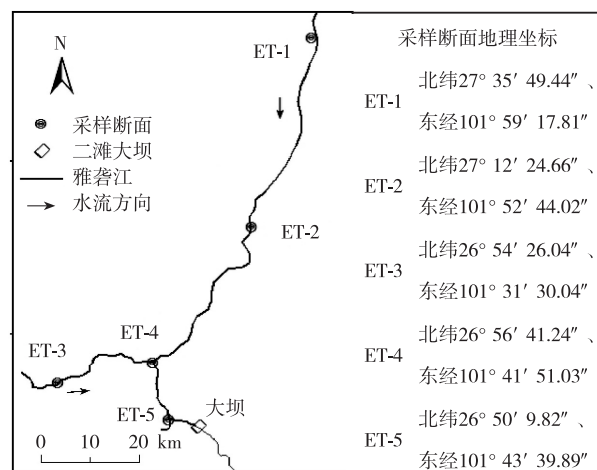
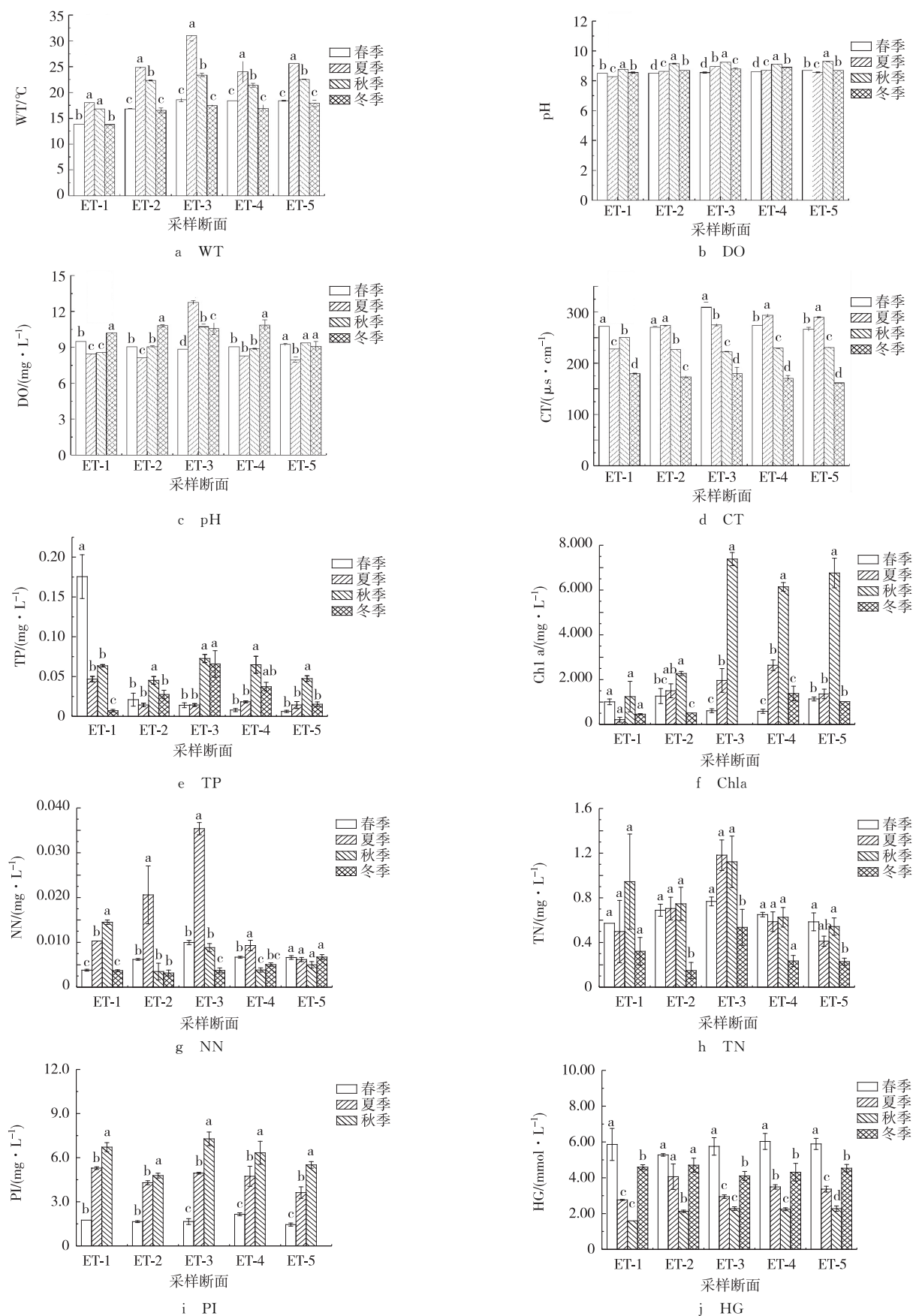


图 1 二滩水库采样断面分布

Fig.1 The distribution of sampling aspects in Ertan reservoir



注:不同字母表示同一断面不同季节的某一水体理化指标差异具有统计学意义($p < 0.05$);冬季 PI 样品因运输途中倾倒及保存问题导致数据缺失

图 2 二滩水库水环境因子的季节变化

Fig. 2 The seasonal change of water environmental factors in Ertan reservoir

由表 1 可知,二滩水库水体在夏秋季为中营养化型,在冬春季表则现为贫营养化型偏中营养状态,各季节按营养化程度由高到低排列依次为:秋季、夏季、冬季、春季。春季水体 TLI 自上游(ET-1 断面)向下游(ET-5 断面)逐渐降低,并且 ET-5 断面的营养程度全年整体上小于其他断面,而 ET-3 断面的 TLI 在夏秋季高于其他断面的 TLI。

表 1 二滩水库 5 个采样断面的 TLI
Tab. 1 TLI of 5 sampling aspectsin Ertan reservoir

| 季节 | 采样断面 | $X_{TLI(Chla)}$ | $X_{TLI(TN)}$ | $X_{TLI(TP)}$ | $X_{TLI(PI)}$ | X_{TLI} | 各季节 X_{TLI} 平均值 |
|----|------|-----------------|---------------|---------------|---------------|-----------|-------------------|
| 春季 | ET-1 | 25.097 | 45.067 | 66.101 | 15.981 | 36.516 | 28.155 |
| | ET-2 | 27.550 | 48.220 | 31.621 | 14.416 | 29.777 | |
| | ET-3 | 19.635 | 50.051 | 25.036 | 14.496 | 26.124 | |
| | ET-4 | 19.206 | 47.233 | 15.948 | 21.459 | 24.803 | |
| | ET-5 | 26.399 | 45.448 | 11.939 | 10.977 | 23.557 | |
| 夏季 | ET-1 | 8.170 | 42.720 | 44.649 | 45.417 | 31.996 | 34.674 |
| | ET-2 | 29.423 | 48.584 | 25.391 | 39.888 | 34.558 | |
| | ET-3 | 32.331 | 57.359 | 25.391 | 43.636 | 38.223 | |
| | ET-4 | 35.557 | 45.484 | 29.389 | 42.468 | 37.343 | |
| | ET-5 | 28.357 | 39.481 | 25.391 | 35.360 | 31.249 | |
| 秋季 | ET-1 | 27.355 | 53.572 | 49.591 | 51.765 | 43.079 | 45.368 |
| | ET-2 | 33.921 | 49.572 | 44.088 | 42.720 | 41.117 | |
| | ET-3 | 46.711 | 56.490 | 51.781 | 53.914 | 50.950 | |
| | ET-4 | 44.713 | 46.595 | 49.928 | 50.193 | 46.919 | |
| | ET-5 | 45.756 | 44.178 | 44.876 | 46.490 | 44.773 | |
| 冬季 | ET-1 | 16.508 | 35.294 | 14.237 | — | 23.412 | 29.057 |
| | ET-2 | 17.719 | 22.279 | 36.010 | — | 27.055 | |
| | ET-3 | — | — | — | — | — | |
| | ET-4 | 28.498 | 29.962 | 40.940 | — | 36.098 | |
| | ET-5 | 25.204 | 29.510 | 26.443 | — | 29.661 | |

2.2 浮游植物种类和群落特征

2.2.1 浮游植物群落种群组成 如封二彩图 3 所示,本研究共检出浮游植物 8 门 124 种,其中属于绿藻门(Chlorophyta)、硅藻门(Bacillariophyta)、蓝藻门(Cyanophyta)和裸藻门(Euglenophyta)的种类分别有 49,43,13 和 10 种,属于甲藻门(Pyrrophyta)、黄藻门(Xanthophyceae)、金藻门(Chrysophyta)和隐藻门(Cryptophyta)的种类数量较少,属于其他门的浮游植物则没有发现。二滩水库在冬季浮游植物种类数最多,为 66 种;在秋季浮游植物种类最少,为 47 种。硅藻门、绿藻门和蓝藻门为浮游植物群落各季节组成的主要优势门类。在夏秋两季,绿藻门的种类数最多;在春季,硅藻门的种类最多;在冬季,蓝藻门、绿藻门和硅藻门的种类数相近。从全年来看,在 ET-1,ET-2,ET-3,ET-4 和 ET-5 断面分别检测出 48,60,75,58 和 61 种浮游植物。在同一季节不同断面上,整体表现为 ET-2,ET-3 和 ET-4 断面的浮游植物种类数比 ET-1 和 ET-5 断面的更多。各断面的浮游植物种类在优势门类上无明显差异。此外,秋季 ET-1 和 ET-2 断面浮游植物种类数明显低于同期各断面的浮游植物平均种类数。

2.2.2 浮游植物密度与生物量 如图 4a 所示,ET-2 断面浮游植物密度的全年平均值最低,为 0.53×10^6 个 $\cdot L^{-1}$; ET-3 断面浮游植物密度的全年平均值最高,为 1.93×10^6 个 $\cdot L^{-1}$ 。ET-3 及 ET-5 断面的浮游植物密度明显比 ET-2 断面的更高。此外,全断面浮游植物密度在秋冬季的平均值大于在春夏季的平均值。图 4b 显示,调查期间 5 个断面浮游植物生物量平均值范围为 $0.39 \sim 1.27$ mg $\cdot L^{-1}$ 。浮游植物生物量的最大值出现在夏季的 ET-5

断面,为 $1.91 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;最小值出现在冬季的 ET-2 断面,为 $0.12 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。浮游植物生物量平均值整体表现为在夏季最高,然后在冬季、春季和秋季该指标依次降低。另外,浮游植物密度与生物量在各个断面间的全年平均值变化趋势相对一致,整体呈现出在 ET-3 断面最高、在 ET-5 断面次之、在 ET-4 和 ET-1 断面再次之、在 ET-2 断面最低的规律。

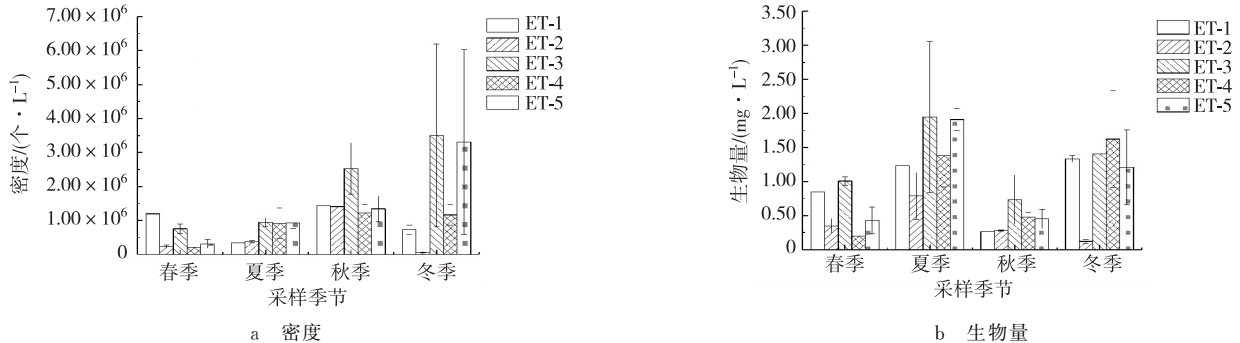


图 4 二滩水库浮游植物密度与生物量

Fig. 4 Phytoplankton density and biomass in Ertan reservoir

2.2.3 浮游植物优势种 表 2 显示,调查期间在 5 个断面共发现浮游植物优势种 6 门 53 种。其中绿藻门优势物种数最多,共有 24 种;其次是硅藻门,有 14 种。从不同季节来看,在春季共发现 16 种优势种,绿藻门的小球藻 (*Chlorella vulgaris*) 在所有断面均为优势种。在夏季也发现了 23 种优势种,其中主要是绿藻门种类。在秋季共发现 13 种优势种,所有断面都有硅藻门的扁圆卵型藻 (*Cocconeis placentula*)、绿藻门的小球藻、椭圆小球藻 (*Chlorella ellipsoidea*) 和四刺顶棘藻 (*Chodatella quadriseta*) 这 4 种优势种。在冬季共发现 17 种优势种,5 个断面的主要优势种均为绿藻门种类。同一季节里不同断面间的浮游植物优势种的演替不明显,但优势种在各断面的分布各不相同:全年在 ET-1, ET-2, ET-3, ET-4 和 ET-5 断面发现的优势种分别为 26, 29, 25, 11 和 21 种。在同一断面,不同季节间优势种的演替则较为明显。

2.2.4 二滩水库浮游植物的生物多样性指数 如图 5 所示, H 的范围在 2.21~3.96 之间, ET-3 断面的 H 最高,达到了 3.15, ET-2 断面的 H 最低,为 2.99。 H 平均值的变化表现为在夏季明显高于在其他季节、在夏秋两季高于在冬春两季,且在 ET-3, ET-5 和 ET-1 断面高于在其他两个断面。 J 的范围在 0.70~0.93 之间, J 平均值变化表现为在不同断面上按 ET-5, ET-1, ET-2, ET-3, ET-4 的顺序依次降低,在春季、夏季和冬季相近而在秋季最低。

2.3 浮游植物群落特征与环境因子的 Pearson 相关性

由表 3 可知,浮游植物密度、生物量与 DO, CT, TN, PI 均呈正相关关系,与 HG 均呈负相关关系。浮游植物密度与 TN 的正相关关系在 $p < 0.05$ 水平上具有统计学意义;与 CT, PI 和 Chla 的正相关关系在 $p < 0.01$ 水平上具有统计学意义。 H 与 WT 的正相关关系在 $p < 0.01$ 水平上具有统计学意义,与 HG 的负相关关系在 $p < 0.01$ 水平上具有统计学意义。 J 与 HG 的正相关关系在 $p < 0.05$ 水平上具有统计学意义;与 pH, Chla 和 PI 的负相关关系在 $p < 0.01$ 水平上具有统计学意义。

3 讨论和结论

3.1 二滩水库环境因子状况

水环境因子与调查区域地势、水文、气象和人类活动等有着密切关系。相较于以往的调查^[18-19],二滩水库的水体 pH 有稳步上升的趋势,这可能是由于近些年来该水库的水土流失情况逐渐改善、库区山地酸性红壤的流失减弱所致。水体 pH 呈碱性有利于藻类的生长^[20],对二滩水库生态渔业的发展也有重要意义。在二滩水库干流沿岸区域没有工业生产活动及大型工农业生产取水设施,也无生活用水要求^[21];因此水体营养物质的来源主要来自于河流上游和两岸土壤,以及日常生活、传统农业中带来的化肥、粪便等。营养物质通过地表径流、降雨及水库水位变动进入到水库中。在整体及具体采样断面上二滩水库水体 TN 在冬季明显比其他季节更低。这是因为当地冬季多为干季且水库处于枯水期,农田和牲畜粪便所含氮元素随地表径流和水位波动进入水体的总量降低;而其他季节则可能因水体内部微生物作用、浮游生物的生长繁殖消耗和不同相面氮元素的交换,维持

表 2 二滩水库浮游植物优势种及它们的优势度

Tab. 2 Dominant species of phytoplankton in Ertan reservoir and their dominance indices

| 门 | 物种 | ET-1 | | | | ET-2 | | | | ET-3 | | | | ET-4 | | | | ET-5 | | | |
|-----|--|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | | 春季 | 夏季 | 秋季 | 冬季 | 春季 | 夏季 | 秋季 | 冬季 | 春季 | 夏季 | 秋季 | 冬季 | 春季 | 夏季 | 秋季 | 冬季 | 春季 | 夏季 | 秋季 | 冬季 |
| 硅藻门 | 具星小环藻 (<i>Cymatopleura stelligera</i>) | | | | | | | | | | | | | 0.04 | | | | 0.06 | | | |
| | 简单舟形藻 (<i>Navicula simplex</i>) | | | | | 0.03 | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 尖针杆藻 (<i>Synedra acus</i> var.) | | | | | 0.06 | | | | | | | | | | 0.10 | | | | 0.03 | |
| | 梅尼小环藻 (<i>Cyclotella meneghiniana</i>) | 0.05 | | | | 0.05 | 0.06 | | | | | | | 0.09 | 0.02 | | 0.08 | 0.13 | | | 0.09 |
| | 美丽星杆藻 (<i>Asterionella formosa</i>) | 0.05 | | | | | | | | | | | | | | | | 0.02 | | | |
| | 钝脆杆藻 (<i>Fragilaria capucina</i>) | | | | 0.09 | | | | | 0.03 | | | 0.09 | | | | | | | | |
| | 扁圆卵型藻 (<i>Cocconeis placentula</i>) | | 0.13 | 0.03 | | | | 0.14 | | 0.07 | 0.10 | | | 0.04 | | | | | 0.08 | 0.09 | |
| | 普通等片藻 (<i>Diatoma vulgure</i>) | | | | | | | | | 0.02 | | | | 0.03 | | | | 0.04 | | | |
| | 中型脆杆藻 (<i>Fragilaria intermedia</i>) | | | | | | | | | | | | 0.03 | | | | | | | | |
| | 短小舟形藻 (<i>Navicula exigua</i>) | 0.02 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 克洛脆杆藻 (<i>Fragilaria crotonensis</i>) | | | | | | | | 0.09 | | | | | | | | | | | | |
| | 脆杆藻 (<i>Fragilaria</i> sp.) | | | | | | | | | | | | | | | 0.16 | | | | 0.03 | |
| | 小环藻 (<i>Cymatopleura stelligera</i>) | | 0.04 | | | | | 0.05 | | | 0.02 | | | | | | | | | | |
| | 四棘藻 (<i>Atteya</i> sp.) | | | | | | | | | | | 0.04 | | | | | | | | | |
| 绿藻门 | 小球藻 (<i>Chlorella vulgaris</i>) | 0.17 | | 0.23 | 0.30 | 0.10 | | 0.23 | 0.20 | 0.28 | 0.03 | 0.16 | 0.06 | 0.39 | 0.05 | 0.12 | 0.13 | 0.35 | | 0.23 | 0.25 |
| | 集星藻 (<i>Actinastrum hantzschii</i>) | | | | | 0.04 | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 浮球藻 (<i>Planktosphaeria gelatinosa</i>) | 0.09 | | | | 0.07 | 0.07 | | | 0.03 | | | | 0.07 | 0.14 | | | 0.02 | 0.04 | | |
| | 小球衣藻 (<i>Chlamydomonas microspira</i>) | | | | | | | | | 0.02 | | | 0.06 | | | | | | 0.03 | | |

续表 2

| 门 | 物种 | ET-1 | | | | ET-2 | | | | ET-3 | | | | ET-4 | | | | ET-5 | | | |
|-----------------------|--|------|------|----|------|------|------|----|------|------|----|----|------|------|------|----|----|------|------|------|----|
| | | 春季 | 夏季 | 秋季 | 冬季 | 春季 | 夏季 | 秋季 | 冬季 | 春季 | 夏季 | 秋季 | 冬季 | 春季 | 夏季 | 秋季 | 冬季 | 春季 | 夏季 | 秋季 | 冬季 |
| 蓝藻门 | 小型色球藻 (<i>Chroococcus minor</i>) | 0.09 | 0.10 | | | 0.06 | 0.11 | | | | | | | 0.03 | | | | | | | |
| | 纤细席藻 (<i>Phormidium tenue</i>) | | | | | | | | | | | | | | | | | 0.02 | | | |
| | 点状平裂藻 (<i>Merismopedia punctata</i>) | | | | | 0.04 | | | | | | | 0.10 | | | | | | | | |
| | 不定微囊藻 (<i>Microcystis incerta</i>) | | | | | | | | | | | | | 0.09 | | | | | | | |
| | 小颤藻 (<i>Oscillatoria tenuis</i>) | | | | 0.05 | | | | | | | | 0.06 | | | | | | | | |
| | 针状纤维藻 (<i>Dactylococopsis acicularis</i>) | | | | 0.12 | | | | | 0.03 | | | 0.06 | | | | | | | | |
| | 湖沼色球藻 (<i>Chroococcus limneticus</i>) | | | | 0.05 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 微小色球藻 (<i>Chroococcus minutus</i>) | 0.03 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 裸藻门 | 矩圆囊裸藻 (<i>Trachelomonas oblonga</i>) | | 0.02 | | | | | | | 0.03 | | | | | 0.03 | | | | | | |
| | 洁净裸藻 (<i>Euglena clara</i>) | | 0.06 | | | | 0.03 | | | 0.03 | | | | | 0.05 | | | | | | |
| | 圆形扁裸藻 (<i>Phacus orbicularis</i>) | | | | 0.04 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 隐藻门 | 卵型隐藻 (<i>Cryptomonas ovata</i>) | | 0.07 | | | | 0.03 | | | 0.02 | | | | 0.07 | | | | 0.07 | 0.02 | | |
| 甲藻门 | 飞燕角甲藻 (<i>Ceratium hirundinella</i>) | | | | | | | | 0.04 | | | | | | | | | | | 0.03 | |
| | 裸甲藻 (<i>Gymnodinium aeruginosum</i>) | | | | | | | | | | | | 0.03 | | | | | | | | |
| | 多甲藻 (<i>Peridinium</i> sp.) | | 0.02 | | | | | | | 0.16 | | | | | | | | | | | |
| 优势种(优势度大于或等于0.02)种类个数 | | 5 | 15 | 6 | 10 | 10 | 11 | 9 | 3 | 9 | 12 | 10 | 10 | 4 | 16 | 8 | 6 | 6 | 8 | 7 | 8 |

了水体氮含量的平衡^[22-23]。水库水体的 PI 在秋季高于在春夏两季,这与库区河流的径流量同样相关:秋季河流径流量的相对减少降低了水体的自净能力,使得其他氧化性物质增加。在没有工业污染的情况下,河流两岸消落带的土壤矿物成为了重要的外部磷源^[24]。水库水体的 TP 明显低于 TN,这可能受益于当地先天的地理条件,即与二滩库区土壤缺磷有密切的关系。水库水体的 TP 在秋季明显高于在其他季节,而 TP 变化主要和非点源

污染有关,即与人类农业活动的季节规律相关。二滩水库整体 Chla 的季节变化情况与田时弥等人^[25]的研究结果相似。由于叶绿素 a 能够直接反应水体中浮游植物的数量及生物量,而浮游植物受到水体温度和营养源的刺激在夏秋两季快速繁殖生长,所以水库水体的 Chla 表现出在夏秋季较高、在秋季明显高于在其他季节的特点。

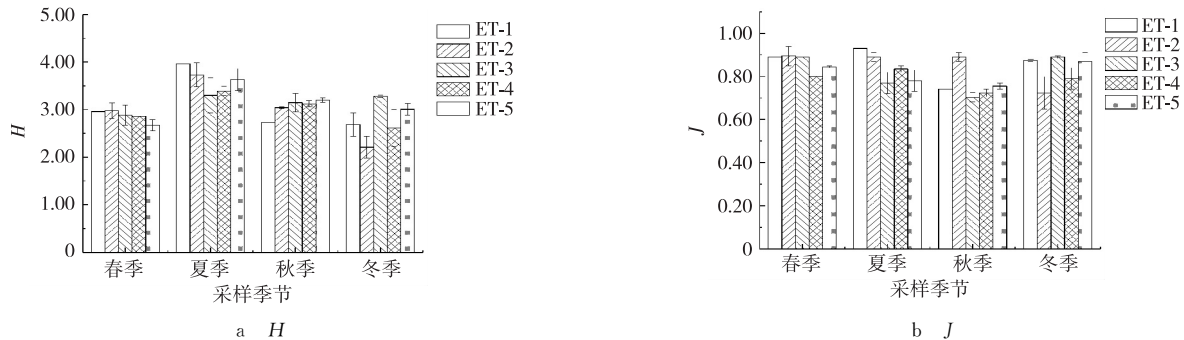


图 5 二滩水库生物多样性指数

Fig. 5 Biodiversity index of Ertan reservoir

表 3 浮游植物群落结构参数与环境因子的相关性分析

Tab. 3 Correlation analysis between phytoplankton community structure parameters and environmental factors

| 参数 | WT | DO | pH | CT | TP | TN | NN | PI | Chla | HG |
|-----|---------|---------|----------|---------|--------|--------|--------|----------|----------|----------|
| 密度 | -0.006 | 0.118 | 0.249 | 0.451** | 0.134 | 0.348* | -0.087 | 0.698** | 0.642** | -0.162 |
| 生物量 | 0.236 | 0.197 | -0.146 | 0.212 | -0.130 | 0.127 | 0.205 | 0.069 | -0.158 | -0.030 |
| H | 0.542** | -0.359* | -0.013 | 0.116 | 0.001 | 0.307 | 0.273 | 0.176 | 0.216 | -0.490** |
| J | -0.260 | -0.292 | -0.540** | 0.223 | -0.164 | -0.007 | 0.005 | -0.660** | -0.681** | 0.365* |

注: * 和 ** 分别表示有关指标的相关性在 $p < 0.05$ 和 $p < 0.01$ 水平上有统计学意义

ET-3 断面处在水库支流处的渔门镇。该处设有码头,人类聚集较为密集,且附近有大量的农田,这就增加了水体营养盐的来源,最终导致了该断面的 WT, TN 和 TP 与其他断面的这 3 个指标有明显差异。而 ET-1 断面 WT 明显低于 ET-3 断面 WT 的原因在于:ET-1 断面离雅砻江官地坝址的距离较近,水体仍受到下泄水温的影响^[26],并且 ET-3 断面由于人类活动而增加了水体的外来热源。ET-4 断面的全年 Chla 明显比其他采样断面的更高,其中原因可能是 ET-4 断面处在水库干流和支流的交汇处,与其他断面相比水面宽度最大,因而水体营养盐较多,光照也较为充足。

参照《地表水环境质量标准(GB3838—2002)》^[27]中的水质划分类型,对二滩水库各采样断面的四季水质进行分类,发现二滩水库全年基本为Ⅱ类到Ⅲ类水,仅在秋季的 ET-1 和 ET-2 断面和夏秋季的 ET-3 断面属于Ⅳ类水,且在夏季的 ET-5 断面为Ⅱ类水。本研究得到的二滩水库水体富营养化程度与杨玖等人^[19]的结果具有差异,可能的原因是本研究没有能得到水库可靠的透明度数据指标,在 TLI 的运算和采样断面的布设上也存在一定差异;但本研究中水体营养状态上升可能是因为人类在日常生活及农业生产中持续不断地向库区添入污染源以及大坝阻隔效应使淤泥和营养盐在坝上长期的蓄积所致^[28]。

3.2 二滩水库浮游植物群落状况

本研究结果显示,二滩水库浮游植物群落类型为绿藻-硅藻型,这与以往研究者的调查结果^[29]相符,但是在物种的种类数上有一定程度的降低。这可能与过去当地进行网箱养殖等开发利用活动有关;这些活动给水库带来了大量的营养物质,有助于提高浮游植物种类的多样性^[30];而在研究中,二滩水库已实行了一段时间的治理,水体中营养物质有所减少,因而营养需求高的物种也随之减少。在秋季,ET-1 和 ET-2 断面的浮游植物种类数明显低于同期 5 个断面的整体水平,其中原因可能为:在秋季,水库受降雨影响导致水位上涨,而这两个断面整体处在二滩水库上游,河水中包含了大量的泥沙,而其他 3 个断面因为泥沙沿河道沉降所以受影响程度相对较小。二滩水库的浮游植物在群落结构与优势种上都存在明显的季节演替现象,这与水体中各项理化性质的改变有着重要的关系,不同的浮游植物有各自的生态位,并受环境因子的影响进行群落更替。温度的季节性变化能影响藻类的分布和生长率,不同藻类对温度的喜好不同:硅藻喜低温,绿藻喜中温,蓝藻喜高温^[31]。冬春两季的

低温适宜于硅藻门浮游植物的生长,所以冬春两季硅藻门优势种种类数量开始提升而夏秋两季适宜于绿藻门浮游植物的生长。本研究在采样调查范围内没有发现水华现象,蓝藻门浮游植物占有所有浮游植物种类数的比例较小,优势种种类数的占比也较小,优势种主要是小型色球藻(*Chroococcus minor*)和针状纤维藻(*Dactylococcopsis acicularis*)。位于坝前的 ET-5 断面中蓝藻基本没有形成优势种,这可能是由于坝前水体更适合绿藻和硅藻的生长,在磷源的竞争上蓝藻处于弱势,且坝前泄水时的水体搅动使水体无法长时间保持较高温度进而限制了蓝藻的繁殖。浮游植物生物量全年均值呈现出在 ET-3 断面最高、在 ET-5 断面次之、在 ET-4 和 ET-1 断面再次之、在 ET-2 断面最低的规律,这可能是由于支流水利开发活动区、坝前淤泥的沉积带来更多的营养盐和坝前热分层更明显^[32],给浮游生物的生长繁殖提供了更加适宜的条件。本研究中,二滩水库浮游植物生物多样性指数 H 和 J 的分析结果整体上与主要水环境因子的测定结果较为一致,显示出水库水体多处于无污染或轻污染状况,水质状况总体良好,这得益于当地长期的水土保持和环境保护工作。

3.3 二滩水库浮游植物群落特征参数与环境因子的相关性

本研究发现,TN,WT 和 PI 是影响二滩水库的主要环境因子。氮和磷是水体中主要的营养源类型,但受制于二滩水库本身水土中的营养源成分,TP 长期处在较低的水平,不是影响水库浮游植物群落特征的主要因素。而氮源来源丰富,持续性的输入给浮游植物提供了生长繁殖的营养源。TN 和 PI 的上升刺激了浮游植物的繁殖,使浮游植物密度升高,但优势种的大量繁殖减少了其他浮游植物种类的出现,所以 J 与 TN 和 PI 表现出负相关。WT 也是影响二滩水库环境的主要因子,与 H 具有统计学意义上的正相关关系($p < 0.01$)。适宜温度能够提升细胞本身的生长代谢繁殖效率,而在适宜的营养状态下,更能激发更多种类的藻类萌发,从而增加浮游植物多样性并提高浮游植物群落结构的稳定性^[33-34]。

总之,根据本研究结果可初步判断二滩水库水质整体处于良好状态,浮游植物群落结构稳定。在全年的时间尺度上,TN,WT 和 PI 是驱动浮游植物群落结构变化的主要因素,但不同季节下水环境因子和浮游植物间的内在联系具有一定的差异,需要更加深入地研究。

参考文献:

- [1] 郑晓东.河道型水库水环境影响预测研究:以金沙江水库为例[D].邯郸:河北工程大学,2012.
ZHENG X D. The river-type reservoir water environmental impact prediction research; a case study of Jinsha reservoir[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2012.
- [2] JIANG L Z, BAN X, WANG X L, et al. Assessment of hydrologic alterations caused by the Three Gorges dam in the middle and lower reaches of Yangtze river, China [J]. Water, 2014, 6(5): 1419-1434.
- [3] FAN H, HE D M, WANG H L. Environmental consequences of damming the mainstream Lancang-Mekong river; a review[J]. Earth-Science Reviews, 2015, 146(7): 77-91.
- [4] MAJOR Y, KIFLE D, NIEDRIST G H, et al. An isotopic analysis of the phytoplankton-zooplankton link in a highly eutrophic tropical reservoir dominated by cyanobacteria[J]. Journal of Plankton Research, 2017, 39(2): 220-231.
- [5] ACEVEDO-TREJOS E, BRANDT G, BRUGGEMAN J, et al. Mechanisms shaping size structure and functional diversity of phytoplankton communities in the ocean[EB/OL]. (2015-03-09)[2020-09-28]. <https://www.nature.com/articles/srep08918>.
- [6] 李然然,章光新,张蕾.查干湖湿地浮游植物与环境因子关系的多元分析[J].生态学报,2014,34(10):2663-2673.
LI R R, ZHANG G X, ZHANG L. Multivariate analysis of the relations between phytoplankton assemblages and environmental factors in Chagan lake wetland[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(10): 2663-2673.
- [7] 吴湘香,李云峰,沈子伟,等.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,2014,21(2):361-368.
WU X X, LI Y F, SHEN Z W, et al. Relationship between phytoplankton community structure and aquatic environmental factors in the Chishui river, a protected tributary of the Yangtze river[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2014, 21(2): 361-368.
- [8] 魏洪祥,石俊艳,王晓光,等.卧龙湖浮游生物群落的演替、影响因子及其水质评价[J].生态科学,2018,37(1):55-61.
WEI H X, SHI J Y, WANG X B, et al. The research on driving environmental factors of plankton community succession and the assessment of water quality in Wolong lake[J]. Ecological Science, 2018, 37(1): 55-61.
- [9] 郑诚,陆开宏,徐镇,等.四明湖水库浮游植物功能类群的季节演替及其影响因子[J].环境科学,2018,39(6):2688-2697.
ZHENG C, LU K H, XU Z, et al. Seasonal succession of phytoplankton functional groups and their driving factors in the Siminghu reservoir[J]. Environmental Science, 2018, 39(6): 2688-2697.
- [10] JIANG Y, HE W, LIU W, et al. The seasonal and spatial variations of phytoplankton community and their correlation with

- environmental factors in a large eutrophic Chinese lake (Lake Chaohu) [J]. *Ecological Indicators: Integrating, Monitoring, Assessment and Management*, 2014, 40(6): 58-67.
- [11] 国家环境保护总局水和废水监测分析方法编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 第 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002
Editorial Board of Water and Wastewater Monitoring and Analysis Methods, State Environmental Protection Administration. *Methods for water and wastewater monitoring and analysis* [M]. 4th edition. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [12] 张觉民, 何志辉. 内陆水域渔业自然资源调查手册[M]. 北京: 农业出版社, 1991.
ZHANG J M, HE Z H. *Handbook of natural resources survey of inland waters fisheries* [M]. Beijing: Agriculture Press, 1991.
- [13] 邓坚. 中国内陆水域常见藻类图谱[M]. 武汉: 长江出版社, 2012.
DENG J. *Atlas of common algae in inland waters of China* [M]. Wuhan: Yangtze River Press, 2012.
- [14] 胡鸿钧, 魏印心. 中国淡水藻类: 系统、生态及分类[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
HU H J, WEI Y X. *Chinese freshwater algae: systems, ecology and classification* [M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [15] 王明翠, 刘雪芹, 张建辉. 湖泊富营养化评价方法及分级标准[J]. 中国环境监测, 2002, 18(5): 47-49.
WANG M C, LIU X Q, ZHANG J H. Evaluate method and classification standard on lake eutrophication [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2002, 18(5): 47-49.
- [16] STRAŠKRABA M, TUNDISI J G. Guidelines of lake management (volume 9) [C]// *Reservoir water quality management*. International Lake Environment Committee. United Kingdom: Routledge Publishers, 1999.
- [17] 沈韞芬. 微生物监测新技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1990.
SHEN Y F. *New microbiological monitoring technology* [M]. Beijing: China Building Industry Press, 1990.
- [18] 宋颖. 二滩水电工程队库区生态地质环境影响的讨论[D]. 成都: 成都理工大学, 2006.
SONG Y. A Study for the effect of Er'tan hydropower project on the ecological-geological environment [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2006.
- [19] 杨玖, 白羽, 张利, 等. 二滩水库近 5 年水质演变趋势及相关性分析[J]. 四川环境, 2018, 37(6): 88-94.
YANG J, BAI Y, ZHANG L, et al. Variation trend and correlation analysis of water quality in recent 5 years in Er'tan reservoir [J]. *Sichuan Environment*, 2018, 37(6): 88-94.
- [20] 徐虎, 刘志平, 袁玲, 等. pH 值对几种淡水藻类生长的影响[J]. 环境科学与技术, 2009, 32(1): 45-47.
XU H, LIU Z P, YUAN L, et al. Effect of pH on growth of several freshwater algae [J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, 32(1): 45-47.
- [21] 康宇. 四川省雅砻江中下游河段水电开发社会环境影响后评价[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
KANG Y. A retrospective study of the social environmental impact for hydropower development in the middle and lower reaches of Yalong river in Sichuan province [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.
- [22] 胡敏鹏. 流域非点源氮污染的滞后效应定量研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
HU M P. Quantitative study on lag effect of watershed non-point source nitrogen pollution [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.
- [23] SUHAS S S, KURIAN S, NAIK H, et al. Variability of organic nitrogen and its role in regulating phytoplankton in the eastern Arabian sea [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2019, 114(23): 550-560.
- [24] 张雷, 秦延文, 贾静, 等. 三峡入库河流澎溪河回水区消落带与岸边土壤磷形态及其分布特征研究[J]. 环境科学学报, 2011, 31(9): 1999-2007.
ZHANG L, QING Y W, JIA J, et al. Phosphorus forms and its distribution characteristics in soils of water-level-fluctuating zone of the backwater reach of the Pengxi river, input river of the Three Gorges reservoir [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(9): 1999-2007.
- [25] 田时弥, 杨扬, 乔永民, 等. 珠江流域东江干流浮游植物叶绿素 a 时空分布及与环境因子的关系[J]. 湖泊科学, 2015, 27(1): 31-37.
TIAN S M, YANG Y, QIAO Y M, et al. Temporal and spatial distribution of phytoplankton chlorophyll-a and its relationships with environmental factors in Dongjiang river, Pearl river basin [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2015, 27(1): 31-37.
- [26] 石晓丹, 焦涛. 大坝运行过程中泄水对坝下游生态系统的影响分析及控制[J]. 水利科技与经济, 2007, 13(5): 320-323.
SHI X D, JIAO T. Analysis and control of impacts of water discharge during large dam operation on the downstream ecosystem [J]. *Water Conservancy Science and Technology and Economy*, 2007, 13(5): 320-323.
- [27] 国家环境保护总局. 地表水环境质量标准(GB3838—2002) [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
State Environmental Protection Administration. *Surface water environmental quality standards (GB3838—2002)* [S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.

- [28] CUNHA D G F, CALIJURI M D C, DODDS W K. Trends in nutrient and sediment retention in Great Plains reservoirs (USA) [J]. *Environmental Monitoring & Assessment*, 2014, 186(2): 1143-1155.
- [29] 邓金燕. 水利开发对二滩水库浮游植物及水质状况季节性影响[J]. *水土保持研究*, 2016, 23(1): 349-355.
DENG J Y. Effect of development of water conservancy on seasonal community structure of phytoplankton and water quality of Ertan reservoir, Sichuan province [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2016, 23(1): 349-355.
- [30] SERAP P. Influence of trout cage culture on water quality, plankton and benthos Anatolian dam lake [J]. *The Israeli Journal of Aquaculture-Bamidgeh*, 2001, 53(3/4): 115-127.
- [31] 郭跃华. 广东省三座大型供水水库浮游植物群落结构动态及其与环境因子的关系[D]. 广州: 暨南大学, 2011.
GUO Y H. Dynamics of phytoplankton community and its relationship with environmental factors in three large reservoir for drinking water supply, Guangdong province [D]. Guangzhou: Jinan University, 2011.
- [32] 甘衍军, 李兰, 武见, 等. 基于 EFDC 的二滩水库水温模拟及水温分层影响研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2013, 22(4): 476-485.
GUAN Y J, LI L, WU J, et al. Water temperature modeling and influence of water temperature stratification of Ertan reservoir based on EFDC [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2013, 22(4): 476-485.
- [33] 张欢, 张佳磊, 刘德富, 等. 三峡水库水温对浮游植物群落演替和多样性的影响[J]. *环境工程技术学报*, 2017, 7(2): 134-139.
ZHANG H, ZHANG J L, LIU D F, et al. The influence of water temperature on phytoplankton community succession and diversity in Three Gorges reservoir [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2017, 7(2): 134-139.
- [34] 谭啸, 孔繁翔, 于洋, 等. 升温过程对藻类复苏和群落演替的影响[J]. *中国环境科学*, 2009, 29(6): 578-582.
TAN X, KONG F X, YU Y, et al. Effects of enhanced temperature on algae recruitment and phytoplankton community succession [J]. *China Environmental Science*, 2009, 29(6): 578-582.

Resources, Environment and Ecology in Three Gorges Area

The Seasonal Change of Phytoplankton Community Structure and Water Environmental Factors in Ertan Reservoir

LI Feng¹, ZENG Rukai², LIU Xiaoshuai², YAO Weizhi¹,
FU Mei¹, XIONG Bo¹, HE Tao¹, SU Shengqi¹

(1. Research Central of Fishery Resources and Environment, College of Fisheries, Southwest University, Chongqing 400715;
2. Yalong River Hydropower Development Company, Ltd., Chengdu 610056, China)

Abstract: [Purposes] The purpose is to investigate the seasonal change of the phytoplankton community structure characteristics and water environmental factors in Ertan Reservoir. [Methods] In the four quarters from 2018 to 2019, 10 parameters of water quality and 5 aspects of phytoplankton community (density, biomass, dominant species, Shannon-Wiener diversity index (H) and Pielous uniformity index (J)) were analyzed in five sections. [Findings] The eutrophication degree of the reservoir was in mesotrophic state generally all year round. There were 124 species of phytoplankton were found in the whole year, which belonged to 8 phyla. Chlorophyta and Diatoma were the dominant phyla, with 49 and 43 species respectively. The annual phytoplankton density and biomass ranged from 0.31×10^6 to 1.34×10^6 individuals $\cdot L^{-1}$ and from 0.43 to $1.91 \text{ mg} \cdot L^{-1}$, with the highest phytoplankton density in autumn and the highest phytoplankton biomass in summer. H ranged from 2.21 to 3.96, while J ranged from 0.70 to 0.93. Phytoplankton diversity is well. According to the results of diversity index analysis, Ertan reservoir was in a state of no pollution or light pollution. Pearson correlation analysis showed that phytoplankton density was significantly positively correlated with TN ($p < 0.01$) and significantly positively correlated with PI extremely ($p < 0.05$). H was significantly positively correlated with WT extremely ($p < 0.01$). J was significantly negatively correlated with PI extremely ($p < 0.01$). [Conclusions] Ertan reservoir had good water quality and stable phytoplankton community. TN, WT, and PI were the main environmental factors affecting phytoplankton community.

Keywords: Ertan reservoir; water environmental factors; phytoplankton; Pearson correlation analysis

(责任编辑 方 兴)

(接正文53页)

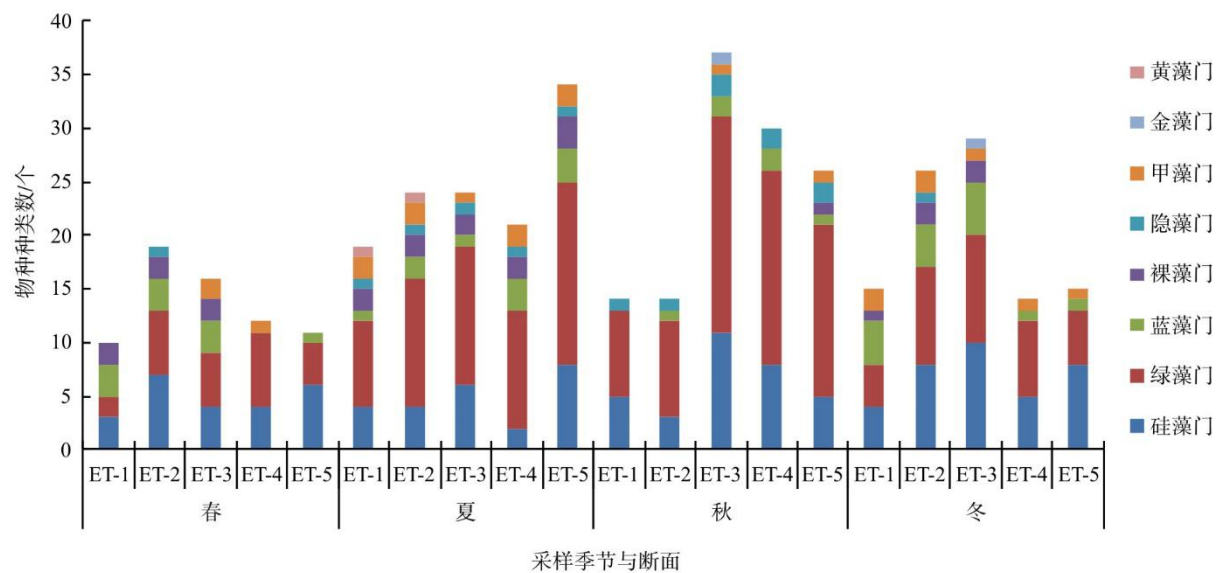


图3 二滩水库浮游植物种类组成
Fig. 3 Species composition of phytoplankton in Ertan reservoir

(接正文95页)



图1 蜻蜓生态照样本
Fig. 1 Samples of natural dragonfly images

图3 雌雄异型示例
Fig. 3 An example of hermaphroditism

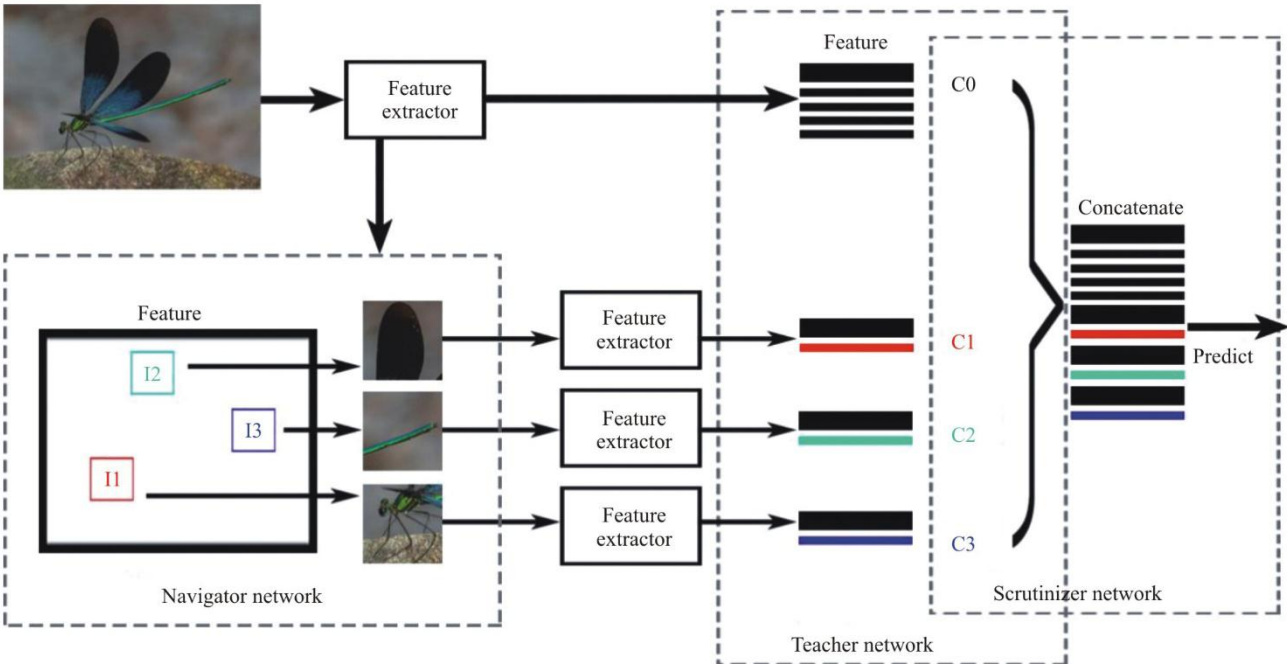


图4 NTS网络设计结构
Fig. 4 Design structure of NTS-Net