

# 水利开发对二滩水库浮游植物及水质状况季节性影响

邓金燕

(内江职业技术学院 建筑工程系, 四川 内江 641100)

**摘要:** 2010—2014年连续5 a(春季、夏季、秋季、冬季)对四川二滩水库进行浮游植物及水质定点采样调查,研究水利开发对浮游植物种类组成、数量特征、群落多样性及水质状况的影响。结果表明:(1)水利开发区共检出浮游植物7门251种,绿藻门(*Chlorophyta*)90种,所占比例为35.86%,对照区共检出浮游植物7门166种,绿藻门68种,所占比例为40.96%,水利开发区和对照区浮游植物种类在夏季和秋季较高,春季和冬季较低;(2)二滩水库水利开发区和对照区浮游植物 Shannon-Wiener 多样性指数( $H$ )、Pielou 均匀度指数( $J_p$ )、Margalef 种类丰富度指数( $S$ )在夏季和秋季较高,春季和冬季较低,随季节呈先增加后降低趋势,而浮游植物密度( $D$ )在秋季最低,不同季节浮游植物密度和丰富度指数均表现为水利开发区显著或者极显著高于对照区,多样性指数和均匀度指数均表现为对照区极显著高于水利开发区( $p < 0.01$ );(3)水利开发区和对照区水温、pH、TN、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、TP、高锰酸钾指数、 $\text{BOD}_5$ 和 $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 浓度呈一致的变化规律,随季节的变化呈先增加后降低趋势,秋季最高,春季和冬季较低,其中水温在夏季最高,透明度随季节变化呈“V”字形规律,在春季最高,秋季最低,而水温和TP浓度在水利开发区和对照区并没有明显差异;不同季节pH、TN、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、高锰酸钾指数、 $\text{BOD}_5$ 和 $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 浓度均表现为水利开发区高于对照区,局部有所波动,在冬季二者的差异不明显,说明了水利开发对二滩水库冬季水质的影响较小;(4)相关性分析表明二滩水库浮游植物群落多样性与水温 and TN 浓度呈显著或极显著正相关,与pH呈显著负相关,说明pH、水温和TN含量是影响二滩水库浮游植物多样性的主要因素。

**关键词:** 水利开发; 二滩水库; 浮游植物; 水质状况; 季节变化

中图分类号: Q178; X524

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2016)01-0349-07

## Effect of Development of Water Conservancy on Seasonal Community Structure of Phytoplankton and Water Quality of Ertan Reservoir, Sichuan Province

DENG Jinyan

(Department of Architectural Engineering, Neijiang Vocational & Technical College, Neijiang, Sichuan 641100, China)

**Abstract:** Studies on the effect of development of Ertan reservoir water conservancy on seasonal community structures of phytoplankton and water quality, including species richness, density and biodiversity indices, and correlation analysis between community index of phytoplankton and water quality parameters were carried out from 2010 to 2014. The results indicated that: (1) 251 species of algae were found in water conservancy development zone, of which 35.86% were Chlorophyta, and 166 species of algae were found in CK zone, of which 40.96% were Chlorophyta, there was great seasonal variation in phytoplankton which showed the species were greater in summer and autumn than those in spring and winter; (2) the Shannon-wiener diversity index ( $H$ ), evenness index ( $J_p$ ) and richness index ( $S$ ) of water conservancy development zone and CK first increased and then decreased with the change of season, which showed these indices were higher in summer and autumn than those in spring and winter, while the density of phytoplankton was the lowest in autumn, the density and richness index of phytoplankton in different seasons showed the sequence: water conservancy development zone > CK, while Shannon-wiener diversity index and evenness index presented the opposite trend; (3) the water temperature, pH, TN,  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ , TP, potassium permanganate index,  $\text{BOD}_5$  and  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  first increased and then decreased with the change of season, which showed these parameters were higher in autumn than those in spring and winter, while transparency showed the V-shape trend with the highest in spring and the lowest in autumn, and water temperature and TP concentration had no significant differences between water conservancy development zone and CK, the water temperature, pH, TN,  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ , TP, potassium permanganate index,  $\text{BOD}_5$  and  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  in different seasons showed the order: water conservancy development zone > CK with local fluctuation,

and the gap was smaller in winter, which indicated that water conservancy development had little effect on water quality in winter; (4) correlation analysis showed that the water temperature and TN concentration had significantly or extremely significantly positive correlation with phytoplankton diversity and pH was significantly negative correlation with phytoplankton diversity, which suggested that water temperature and TN concentration were the main influencing factors on phytoplankton diversity in Ertan reservoir.

**Keywords:** water conservancy development; Ertan reservoir; phytoplankton; water quality; seasonal change

浮游植物作为淡水生态系统中的初级生产者,是生态系统中物质循环和能量流动的基础,其群落结构会引起生态系统中食物网结构的改变<sup>[1-3]</sup>,从而影响着水生生态系统的功能、结构和信息传递<sup>[4-6]</sup>。由于浮游植物对环境因子的响应十分敏感,其种类组成、数量分布、群落结构等是评价水环境质量的重要指示作用,成为用来评价江河、湖泊、水库等水质变化的敏感指标,在水体的监测和评价中起极为重要的应用意义<sup>[1,7-8]</sup>。浮游植物的群落结构与生活的水质状况密切相关,利用浮游植物来评价和监测水质的研究也在逐步开展<sup>[9-11]</sup>。近年来,对水库水质理化指标的研究比较多,但关于浮游植物群落结构及水质的季节变化较少。

二滩水库是四川省重要的生态屏障,也是重要的渔业基地和水利区,发挥着调节气候<sup>[12]</sup>、保护生物多样性<sup>[13]</sup>、发展生态经济<sup>[14]</sup>、维护生态平衡<sup>[15]</sup>、水土保持<sup>[16]</sup>等重要功能。在全球气候变化和人类活动影响下二滩水库水环境发生了严重的改变,已面临农业面源污染、有机污染、生活垃圾污染等严峻的生态环境问题<sup>[17-19]</sup>。一方面,水利开发和建设带来了灌溉、供水、旅游、航运、养殖等经济效益,在保障电网安全、节能减排等方面也发挥了重要的作用<sup>[20]</sup>;另一方面,水利开发尤其是水电站的建设,改变了天然河道浮游植物及水质分布规律,不可避免地给流域生物多样性和生态环境带来一些负面影响,已成为水利开发与建设中不容忽视的环境问题<sup>[21-22]</sup>。本文连续 5 a 较系统地调查和分析不同季节二滩水库浮游植物群落组成及水质状况特征,应用冗余分析(RDA)探讨二滩水库浮游植物群落与环境因子间的关系和评价其水质状况,以期为二滩水库水资源开发、水环境保护及污染防治对策提供生物学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 样点布设

二滩水库位于四川省攀枝花市境内的雅砻江下游河段二滩峡谷区域(河道型水库),距攀枝花市约 46 km,系雅砻江梯级开发的第一期开发工程,最大水深 188 m,干流库区水面平均宽度约 400 m,形成前河段为连续天然河道,平均流速为 1.0~2.5 m/s,水深 5.5~9.4 m,年平均水温 11.7~15℃,水位 500~1 000 m;水库形成后二滩大坝将研究河段一分为

二,水库上游仍维持天然河道的特征,最大水深增至 180 m,流速大幅度减少,呈现湖库特征;水库下游除了水温等指标发生变化外,仍保持天然河道的特征<sup>[17]</sup>。本研究中水利开发区选择二滩水库下游距离水电站周边 5 km 的区域,该区域位于雅砻江下游金龙沟和中滩沟之间长约 1 km 的峡谷内,最大坝高 240 m;对照区选择水库上游,距离水电站约 50 km。

### 1.2 采样方法

2010—2014 年连续 5 a 不同季节(春季 2 月、夏季 5 月、秋季 8 月、冬季 11 月)定期(月中)、定点(每个区 15 个采样点)采集样品(采集深度 50 cm),现场测定水温、透明度、pH 采用多参数水质监测仪(HI9828),定性、定量采集样品测定浮游植物多样性及水质状况。浮游植物(定性测量样品)以国际标准的 25 号浮游生物网在水面表层呈“∞”字形缓慢来回拖取 3~5 min 捞取浮游植物样品,浓缩生物网中的水到 100 ml 后 1~2 ml 鲁哥试剂固定,带回实验室以备镜检,另取表层水样 1 L,摇匀后带回实验室用于测定水质状况;浮游植物(定量测量样品)使用有机玻璃采水器在表层采取水样 1 L,10~15 ml 鲁哥试剂固定,带回实验室后经 24 h 沉淀浓缩至 30 ml,加入 4% 甲醛溶液保存以备镜检<sup>[7-8]</sup>。

### 1.3 样品测定

将定量样品摇匀后,在显微镜(400 x)下进行,采用特定的浮游生物计数框(Palmer Counting Cell)计数,选取 20~40 个视野,每个样本重复计数 3 次,有效统计数值。计算结果为藻类细胞密度,即单位体积内藻类细胞个体数表示,对于比较难判断的藻类,则任选 20 个个体在高倍镜下观察,测出细胞数取均值,依据《中国淡水藻类志》鉴定藻类组成<sup>[23]</sup>。

选用 Margalef 丰富度指数( $S$ )、Shannon-Wiener 多样性指数( $H$ )、Simpson 优势度指数和 Pielou 均匀度指数( $J_P$ )分析浮游植物物种多样性<sup>[1-2]</sup>:

$$S = (N - 1) / \ln N \quad (1)$$

$$H = - \sum (P_i \ln P_i) \quad (2)$$

$$J_P = H / \ln S \quad (3)$$

式中: $S$ ——总物种数; $N$ ——样品中生物总个体数量; $P_i$ ——第  $i$  种的个体数量( $n_i$ ) 在总个体数量( $N$ ) 中的比例。Shannon-Wiener 指数值为 0~1 时,水体为重污染;值为 1~3 时,水体为中污染,其中,值为

1~2时,水体为 $\alpha$ -中污染,值为2~3时,水体为 $\beta$ -中污染;其值>3时,水体为轻污染或无污染<sup>[1-2,7-8]</sup>。

水质测定项目包括 TN, TP,  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ ,  $\text{BOD}_5$ ,  $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 和高锰酸钾指数;TN 采用过硫酸钾—紫外分光光度法;TP 采用钼锑抗分光光度法; $\text{NH}_4^+-\text{N}$  采用纳氏试剂分光光度法; $\text{BOD}_5$  采用稀释接种法; $\text{COD}_{\text{Cr}}$  采用重铬酸钾氧化法;高锰酸钾指数采用高锰酸钾氧化法<sup>[24-25]</sup>。

1.4 数据处理

采用 Excel 2003 和 SPSS 17.0 进行数据统计和方差分析检验,以平均值±标准误差表示(Mean±SD),所有原始数据进行对数转换,变量的显著性通过蒙特卡洛(Monte Carlo)检验(499 次),CANOCO 4.5 对浮游植物多样性与环境因子进行 RDA (Redundancy Analysis)冗余分析<sup>[26]</sup>;采用 Pearson 相关分析法检验各环境因子的独立性与浮游植物多样性的相关性<sup>[27]</sup>,利用 Origin 7.5 作图。

2 结果与分析

2.1 水利开发对二滩水库浮游植物群落结构的影响

由表 1 可知,在四川二滩水库采样水体中,水利开发区共检出浮游植物 7 门 251 种,其中,绿藻门 90 种,所占比例为 35.86%,硅藻门 65 种,所占比例为 25.90%,蓝藻门 36 种,所占比例为 14.34%,隐藻门 30 种,所占比例为 11.95%,甲藻门 17 种,所占比例为 6.77%,金藻门 8 种,所占比例为 3.19%,裸藻门 5 种,所占比例为 1.99%;对照区共检出浮游植物 7 门 166 种,其中,绿藻门 68 种,所占比例为 40.96%,硅藻门 51 种,所占比例为 30.72%,蓝藻门 20 种,所占比例为 12.05%,隐藻门 11 种,所占比例为 6.63%,甲藻门 6 种,所占比例为 3.61%,金藻门 5 种,所占比例为 3.01%,裸藻门 5 种,所占比例为 3.01%。水利开发区和对照区浮游植物种类在夏季和秋季达到较高,春季和冬季较低。

表 1 水利开发对二滩水库浮游植物群落结构的影响

区域	季节	绿藻门	硅藻门	蓝藻门	隐藻门	甲藻门	金藻门	裸藻门	合计
水利开发区	春季	24	17	8	6	5	2	2	64
	夏季	21	15	10	7	5	2	1	61
	秋季	26	19	11	9	4	3	1	73
	冬季	19	14	7	8	3	1	1	53
对照区	春季	18	13	5	4	2	2	1	45
	夏季	15	11	5	3	2	1	1	38
	秋季	19	15	6	2	1	1	2	46
	冬季	16	12	4	2	1	1	1	37

2.2 水利开发对二滩水库浮游植物多样性的影响

浮游植物群落的多样性指数具有生态学指示作用,为避免采用单一的多样性指数来解释浮游植物群落的多样性出现偏差,本研究采用以浮游植物数量进行计算的 Shannon-Wiener 多样性指数( $H'$ )、Pielou 均匀度指数( $J_p$ )、Margalef 种类丰富度指数( $S$ )以及浮游植物密度( $D$ ),从不同季节对二滩水库春、夏、秋、冬季浮游植物多样性进行分析。4 种多样性指数显示(图 1),二滩水库水利开发区和对照区浮游植物 Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数、Margalef 种类丰富度指数在夏季和秋季较高,春季和冬季较低,随季节呈先增加后降低趋势,而浮游密度在秋季达到最低。水利开发区浮游植物密度变化范围为  $5\times 10^5\sim 1.9\times 10^6$  cells/L,多样性指数变化范围为 0.72~1.68,均匀度指数变化范围为 6.2~9.5,丰富度指数变化范围为 0.53~0.82;对照区浮游植物密度变化范围为  $3\times 10^5\sim 1.6\times 10^6$  cells/L,多样性指数变化范围为 2.45~3.14,均

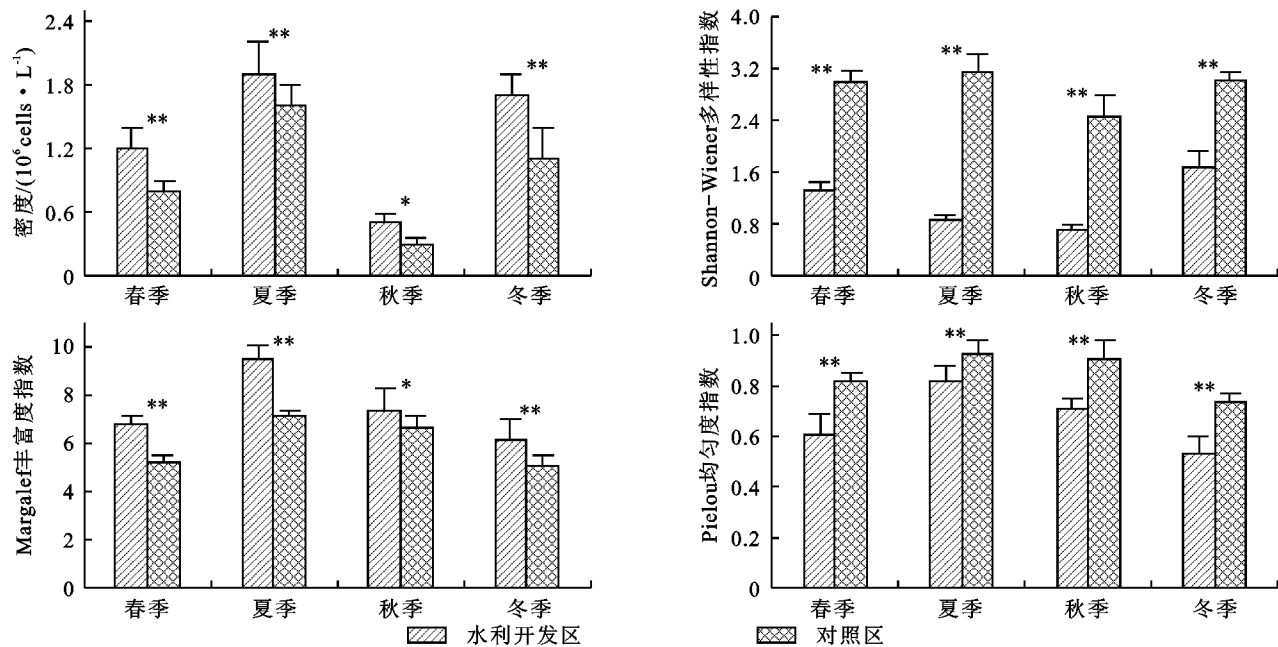
匀度指数变化范围为 5.2~6.7,丰富度指数变化范围为 0.74~0.93。不同季节浮游植物密度和丰富度指数均表现为水利开发区显著或者极显著高于对照区,多样性指数和均匀度指数均表现为对照区极显著高于水利开发区( $p<0.01$ )。

2.3 水利开发对二滩水库水质状况的影响

由图 2 可知,水利开发对二滩水库水质季节性影响较为明显,水利开发区和对照区水质中水温,pH,TN,  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ ,TP,高锰酸钾指数, $\text{BOD}_5$  和  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  浓度呈一致的变化规律,随季节的变化呈先增加后降低趋势,在秋季最高,春季和冬季较低,其中水温在夏季最高,水质透明度呈“V”字形变化规律,在春季最高,秋季最低。水利开发区水温变化范围为 4.1~8.7℃,透明度变化范围为 24~52 cm,pH 变化范围为 7.8~9.3,TN 浓度变化范围为 3.2~7.2 mg/L,TP 浓度变化范围为 0.06~0.23 mg/L, $\text{NH}_4^+-\text{N}$  浓度变化范围为 2.5~4.8 mg/L,高锰酸钾指数变化范围为 7.6~14.9 mg/L, $\text{BOD}_5$  变化范围为

49.7~82.3 mg/L,  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  变化范围为 149~265 mg/L; 对照区水温变化范围为 4.3~8.1℃, 透明度变化范围为 37~65 cm, pH 变化范围为 7.1~8.4, TN 浓度变化范围为 2.9~6.1 mg/L, TP 浓度变化范围为 0.07~0.24 mg/L,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度变化范围为 1.8~3.4 mg/L, 高锰酸钾指数变化范围为 5.1~11.3 mg/L,  $\text{BOD}_5$  变化范围为

42.3~53.8 mg/L,  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  变化范围为 121~185 mg/L。不同季节 pH, TN,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ , 高锰酸钾指数,  $\text{BOD}_5$  和  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  浓度均表现为水利开发区高于对照区, 局部有所波动, 而在冬季二者之间的差距较小, 水温和 TP 浓度并没有明显的变化趋势, 不同季节水质透明度则表现为对照区极显著高于水利开发区 ( $p < 0.01$ )。



注: \*\* 表示差异性在 0.01 水平显著; \* 表示差异性 0.05 水平上显著, 下同。

图 1 水利开发对浮游植物多样性的影响

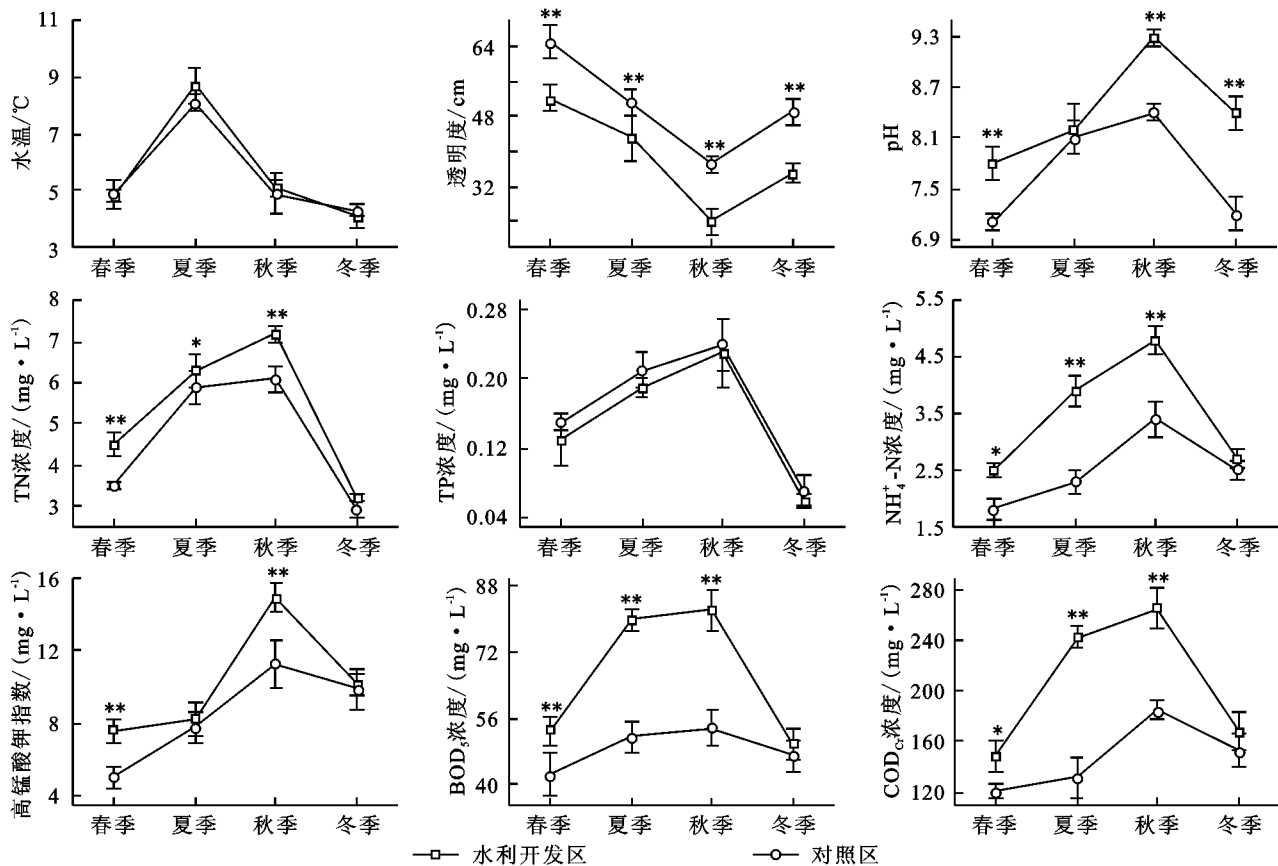


图 2 水利开发对二滩水库水质状况的影响

2.4 二滩水库浮游植物群落指标与水体理化因子的关系

将各环境因子与二滩水库浮游植物群落多样性分别进行相关分析,以水利开发区和对照区的每个样本的水质指标为自变量,浮游植物群落指标为因变量作相关分析。

结果显示(表 2):二滩水库水利开发区浮游植物丰富度指数与水温、TN 和  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度呈极显著正相关( $p<0.01$ );多样性指数与水温和 TN 浓度呈

极显著正相关( $p<0.01$ ),与  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度呈显著正相关( $p<0.05$ );均匀度指数与 TN 和  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度呈极显著正相关( $p<0.01$ ),与水温呈显著正相关( $p<0.05$ )。对照区浮游植物丰富度指数与水温和  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度呈极显著正相关( $p<0.01$ ),与 TN 浓度显著正相关( $p<0.05$ );多样性指数与水温、TN 和  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度呈极显著正相关( $p<0.01$ );均匀度指数水温呈极显著正相关( $p<0.01$ ),与  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度呈显著正相关( $p<0.05$ )。

表 2 二滩水库浮游植物群落多样性与水质指标的关系

影响因子	水利开发区			对照区		
	Margalef 丰富度指数	Shannon-Wiener 多样性指数	Pielou 均匀度指数	Margalef 丰富度指数	Shannon-Wiener 多样性指数	Pielou 均匀度指数
水温	0.562**	0.661**	0.489*	0.671**	0.714**	0.501**
透明度	-0.140	0.056	0.098	0.210	0.107	0.051
pH	-0.103	-0.256	-0.173	-0.230	-0.114	-0.205
TN 浓度	0.703**	0.569**	0.662**	0.485*	0.512**	0.301
TP 浓度	0.351	-0.271	-0.301	0.105	-0.214	-0.109
$\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度	0.556**	0.423*	0.621**	0.712**	0.605**	0.463*
$\text{BOD}_5$ 浓度	-0.169	-0.014	0.078	-0.321	-0.107	0.185
$\text{COD}_{\text{Cr}}$ 浓度	-0.125	-0.231	-0.089	-0.235	-0.421*	-0.124
高锰酸钾指数	-0.089	-0.123	0.231	-0.301	-0.256	-0.157

注:\*\*表示相关性在 0.01 水平上极显著(双尾);\*表示相关性在 0.05 水平上显著(双尾),下表同。

2.5 二滩水库浮游植物多样性与环境因子的 RDA 冗余分析

冗余分析(RDA)能够客观反映群落与环境因子的相互关系,近些年被广泛应用于湖泊等水体藻类群落与水环境因子复杂关系的研究<sup>[26]</sup>。本研究中 RDA 分析结果显示,二滩水库浮游植物多样性受外界环境的影响较大,为了尽可能多地把浮游植物多样性与环境因子结合并揭示植物多样性与环境之间的相互关系,将不同季节浮游植物多样性作为物种指标,9 项水质因子作为环境因素进行 RDA 分析。由表 3 可知,前两个排序轴特征值分别为 0.628,0.205,第 1 排序轴可反映不同生态环境下环境因子的梯度变化特征,浮游植物多样性与环境因子两个排序轴的相关性均为 1.000,前两个排序轴特征值占总特征值的 98.24%,蒙特卡罗检验分析环境因子对植物的影响达到显著性(第 1 轴  $p=0.001$ , $F=5.69$ ;第 2 轴  $p=0.001$ , $F=4.12$ ),能够很好地解释环境因子对植物的影响。由表 3 可知,二滩水库浮游植物多样性与水质状况均呈显著正相关关系( $p<0.01$ ),二滩水库浮游植物多样性影响最大的是水温(0.856)、TN 浓度(0.763)和  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度(0.658),与 Pearson 相关分析的结果基本一致。

表 3 RDA 排序结果

排序轴	轴 1	轴 2
特征值	0.628	0.205
变量累积百分比	—	—
物种数据	62.800	82.300
物种—环境关系	62.800	82.300
蒙卡罗检验	499.000	499.000
$p$ 值	0.001	0.001
$F$ 值	5.690	4.120
物种—环境相关性	1.000	1.000
变量解释	98.240	—
所有特征值之和	1.000	—
所有典范特征值之和	1.000	—
水温	0.856**	0.713**
透明度	0.234	-0.103
pH	-0.592*	-0.231
TN 浓度	0.763**	0.551*
TP 浓度	0.256	0.378
$\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度	0.658**	0.613**
$\text{BOD}_5$ 浓度	0.221	0.357
$\text{COD}_{\text{Cr}}$ 浓度	0.104	-0.059
高锰酸钾指数	0.413	0.310

### 3 讨论与结论

本研究中,二滩水库水利开发区共检出浮游植物 7 门 251 种,对照区共检出浮游植物 7 门 166 种,主要种类为绿藻门,可以初步推断二滩水库藻类植物的群落组成主要为绿藻类型;水利开发区和对照区浮游植物种类在夏季和秋季达到较高,春季和冬季较低,水利开发区浮游植物总数显著高于对照区,但二者浮游植物种类保持不变,并且水利开发区和对照区浮游植物 Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数、Margalef 种类丰富度指数随季节呈先增加后降低趋势,在春季和冬季温度较低时,二滩水库的浮游植物种类比较少,但仍然是绿藻门和硅藻门浮游植物占主导,与前人的研究结果相一致<sup>[4-5,28-29]</sup>。夏季和秋季,水温较高,在加上水质中 TN 和 TP 浓度较高,导致浮游植物种类数丰富<sup>[7-8]</sup>。受水利开发等条件的影响,浮游植物密度在秋季达到最低,不同季节浮游植物密度和丰富度指数均表现为水利开发区显著或者极显著高于对照区,多样性指数和均匀度指数均表现为对照区极显著高于水利开发区( $p < 0.01$ ),由此表明,水利开发增加了二滩水库浮游植物总数和密度,而降低了浮游植物的多样性指数和均匀度指数,对浮游植物多样性的季节分布影响并不大。

本研究中浮游植物在夏季密度最大,秋季最低,参照况琪军<sup>[11]</sup>评价水质的标准,浮游植物细胞密度  $\leq 5 \times 10^5$  cells/L,水体为极贫营养水体,  $\leq 1.0 \times 10^6$  cells/L 为贫营养,  $1.0 \times 10^6 \sim 9.0 \times 10^6$  cells/L 为贫中营养。由此可见,二滩水库秋季水质最差,为极贫营养水体,夏季和冬季达到贫中营养水平。浮游植物多样性指数是判断水库营养状况最常用的检测指标,  $H > 3$  为轻或无污染,  $3 \sim 2$  为  $\beta$ -中度污染(轻中污染),  $2 \sim 1$  为  $\alpha$ -中度污染(重中污染),  $0 \sim 1$  为重度污染,也即  $H$  指数值越大,水质越好,即藻类的种类多样性指数越高,其群落结构越复杂<sup>[4-5,11]</sup>。水利开发区浮游植物的  $H$  值和  $J$  值均较低,综合反映了二滩水库水利开发区水质状况较差,污染严重,物种多样性一般或不丰富;对照区浮游植物的  $H$  值和  $J$  值均较高,物种多样性较为丰富,水质状况较好。综合以上研究表明二滩水库水利开发区水质有富营养化的趋势,这主要与水电站的建设与开发有关,并与开发过程中产生的污染和城市生活污水、工业废水排入水库有关。图 2 的结果显示二滩水库不同季节 pH, TN,  $\text{NH}_4^+$ -N, 高锰酸钾指数,  $\text{BOD}_5$  和  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  浓度均

表现为水利开发区高于对照区,局部有所波动,而在冬季二者之间的差距较小,说明了水利开发对二滩水库冬季水质的影响较小。

淡水水体中 N、P 元素长期以来被认为是与浮游植物生长密切相关,其中 P 被广泛认为是淡水浮游植物演替的影响因素<sup>[1-2,7-8]</sup>,但在二滩水库 TP 并非影响浮游植物群落分布的主要驱动力。本研究相关性分析显示二滩水库浮游植物群落多样性与水温 and TN 浓度呈显著或极显著正相关,与 pH 呈显著负相关,由此表明二滩水库更多受氮等营养元素干扰,并且水利开发区污染物面积相对宽阔,需注意控制加强库区的面源污染,合理规划农业土地利用,尽量减少化肥施用量等,这对于减轻水库营养水平和浮游植被的恢复有重要意义<sup>[17-19]</sup>。冗余分析(RDA)作为一种直接梯度分析方法,不仅维持了良好的景观,而且环境各因子对浮游植物也表现出明显的反馈作用<sup>[26-27]</sup>。由表 3 可知,二滩水库浮游植物多样性影响最大的是水温(0.856)、TN 浓度(0.763)和  $\text{NH}_4^+$ -N 浓度(0.658),浮游植物多样性对水温、TN 浓度和  $\text{NH}_4^+$ -N 浓度反应较为敏感,在某种程度上反映了其指示作用,能够表征二滩水库浮游植物的敏感性,但不同季节植物多样性与环境因子之间的内在联系还需要深入研究。另外,本研究利用 RDA 分析手段初步探讨了不同季节环境因子与浮游植物多样性之间的关系,但研究区域仅仅只是小尺度范围,大尺度下环境因子与浮游植物多样性的关系有待于进一步探讨。

#### 参考文献:

- [1] Rau G H, Takahashi T, Des Marais D J. Latitudinal variations in plankton C: Implications for CO and productivity in past oceans[J]. *Nature*, 1989, 341(5): 165-171.
- [2] Tilman D, Kilham S S, Kilham P. Phytoplankton community ecology: The role of limiting nutrients [J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1982, 15 (8): 349-372.
- [3] Teeling H, Fuchs B M, Becher D, et al. Substrate-controlled succession of marine bacterioplankton populations induced by a phytoplankton bloom[J]. *Science*, 2012, 336 (6081): 608-611.
- [4] Arthaud F, Mousset M, Vallod D, et al. Effect of light stress from phytoplankton on the relationship between aquatic vegetation and the propagule bank in shallow lakes[J]. *Freshwater Biology*, 2012, 57(4): 666-675.
- [5] Birk S, Bonne W, Borja A, et al. Three hundred ways to assess Europe's surface waters: An almost complete

- overview of biological methods to implement the Water Framework Directive[J]. *Ecological Indicators*, 2012, 18:31-41.
- [6] Pomati F, Jokela J, Simona M, et al. An automated platform for phytoplankton ecology and aquatic ecosystem monitoring[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(22):9658-9665.
- [7] Trolle D, Hamilton D P, Hipsey M R, et al. A community-based framework for aquatic ecosystem models[J]. *Hydrobiologia*, 2012, 683(1):25-34.
- [8] Edwards K F, Litchman E, Klausmeier C A. Functional traits explain phytoplankton community structure and seasonal dynamics in a marine ecosystem[J]. *Ecology Letters*, 2013, 16(1):56-63.
- [9] Reynolds C S, Maberly S C, Parker J E, et al. Forty years of monitoring water quality in Grasmere (English Lake District): Separating the effects of enrichment by treated sewage and hydraulic flushing on phytoplankton ecology[J]. *Freshwater Biology*, 2012, 57(2):384-399.
- [10] Schaffelke B, Carleton J, Skuza M, et al. Water quality in the inshore Great Barrier Reef lagoon: Implications for long-term monitoring and management[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2012, 65(4):249-260.
- [11] 陈家长, 孟顺龙, 胡庚东, 等. 长江下游江段秋季浮游植物生态指标与理化指标评价[J]. *长江流域资源与环境*, 2015, 19(S2):37-42.
- [12] Quinn P K, Bates T S. The case against climate regulation via oceanic phytoplankton sulphur emissions[J]. *Nature*, 2011, 480(7375):51-56.
- [13] Parmesan C, Burrows M T, Duarte C M, et al. Beyond climate change attribution in conservation and ecological research[J]. *Ecology Letters*, 2013, 16(S1):58-71.
- [14] Not F, Siano R, Kooistra W H C F, et al. Diversity and Ecology of Eukaryotic Marine Phytoplankton[J]. *Advances in Botanical Research*, 2012, 64:1-53.
- [15] Kimmerer W J, Thompson J K. Phytoplankton growth balanced by clam and zooplankton grazing and net transport into the low-salinity zone of the San Francisco Estuary[J]. *Estuaries and Coasts*, 2014, 37(5):1202-1218.
- [16] Heathcote A J, Filstrup C T, Downing J A. Watershed sediment losses to lakes accelerating despite agricultural soil conservation efforts[J]. *PLOS ONE*, 2013, 8(1):e53554.
- [17] 张士杰, 彭文启. 二滩水库水温结构及其影响因素研究[J]. *水利学报*, 2009, 40(10):1254-1258.
- [18] 吴世勇, 王红梅, 黄新生. 二滩水电站对局地环境的影响及效益[J]. *四川水力发电*, 2005, 24(S):85-87.
- [19] 陈国春. 雅砻江二滩水电站水库对局地气候影响分析[J]. *四川水力发电*, 2007, 26(2):77-80.
- [20] Heijerick D G, De Schampelaere K A C, Janssen C R. Predicting acute zinc toxicity for *Daphnia magna* as a function of key water chemistry characteristics: Development and validation of a biotic ligand model[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2002, 21(6):1309-1315.
- [21] 相震, 吴向培, 王连军, 等. 直岗拉卡水电站工程生态环境的影响分析[J]. *自然资源学报*, 2004, 19(5):646-650.
- [22] 郭新春. 基于 GIS 的大型水电工程库区气温空间模拟方法[J]. *水力发电*, 2014, 40(2):33-36.
- [23] 黎尚豪, 毕列爵. 中国淡水藻志[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1998.
- [24] Gazzaz N M, Yusoff M K, Aris A Z, et al. Artificial neural network modeling of the water quality index for Kinta River (Malaysia) using water quality variables as predictors[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2012, 64(11):2409-2420.
- [25] Munna G M, Chowdhury M M I, Ahmed A A M, et al. A Canadian Water Quality Guideline-Water Quality Index (CCME-WQI) based assessment study of water quality in Surma River[J]. *Journal of Civil Engineering and Construction Technology*, 2013, 4(3):81-89.
- [26] De Tezanos Pinto P, Lombardo R, O'Farrell I, et al. Drivers shaping phytoplankton diversity and composition in a humid Pampean floodplain lake (Natural Reserve)[J]. *Hydrobiologia*, 2015, 752(1):77-89.
- [27] Prowe A E F, Pahlow M, Dutkiewicz S, et al. Top-down control of marine phytoplankton diversity in a global ecosystem model[J]. *Progress in Oceanography*, 2012, 101(1):1-13.
- [28] 袁宇翔, 于洪贤, 姜明. 小兴凯湖浮游植物群落结构及多样性[J]. *湿地科学*, 2013, 11(2):151-157.
- [29] 李喆, 姜作发, 霍堂斌, 等. 黑龙江中游浮游植物多样性动态变化及水质评价[J]. *中国水产科学*, 2012, 19(4):671-678.