

丹江口水库浮游植物群落时空动态及其多样性指数

谭香^{1,2}, 夏小玲¹, 程晓莉¹, 张全发^{1*}

(1. 中国科学院武汉植物园水生植物与流域生态重点实验室, 武汉 430074; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:通过对丹江口水库 2009 ~ 2010 年的水质和浮游植物进行调查, 分析了浮游植物群落的时空动态, 利用典型对应分析法 (CCA) 研究了影响群落时空格局的环境因素, 同时运用细胞密度及群落多样性指数等进行了水质综合评价. 结果表明, 浮游植物群落种类组成中硅藻门占 51.08%, 其次是蓝藻 (18.39%); 浮游植物群落结构、密度及生物多样性指数都具有明显的季节变化特征, 夏季蓝藻为优势藻类, 占 42.24%, 春、秋和冬季硅藻均为绝对优势种类, 分别占 77.13%、61.29% 和 50.91%, 因此丹江口水库已成为硅藻-蓝藻型水库. 在夏季 (8 月) 浮游植物密度达到 1.76×10^6 cells/L, 为全年最大值, 其次是冬季 (1 月) 和春季 (4 月), 秋季 (11 月) 密度最低, 仅为 2.32×10^5 cells/L. 除 Margalef 指数 (D_m) 外, Shannon-Wiener 指数 (H')、Simpson 指数 (D)、Pielou 指数 (J) 季节变化趋势一致, 秋季、夏季、春季到冬季依次减小. 指数 H' 、 D 、 J 秋季都达到最大, 分别为 2.08、0.77 和 0.65; 在冬季值最小, 依次为 0.85、0.32 和 0.28. 丹江口水库的丹库和汉库库区浮游植物群落有显著的空间分布差异, 丹库硅藻门为优势种类, 而在汉库蓝藻和隐藻种群数量较高, 但是物种的多样性、丰富度及均匀度指数的空间差异不显著. 典型对应分析表明, 在不同季节和不同库区影响浮游植物群落分布的主要因素不同, 除秋季外电导是丹江口水库各个季节影响群落结构的最主要因素. 从浮游植物细胞密度评价丹江口水库水体为贫营养水体; 从多样性指数分析来看, 水体介于 β -中污染带到寡污染带之间. 此研究对于利用浮游植物监测丹江口水库水质综合状况及进行生态评价与预测提供了依据.

关键词: 丹江口水库; 浮游植物; 水质; 时空动态; 多样性指数

中图分类号: X173 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2011)10-2875-08

Temporal and Spatial Pattern of Phytoplankton Community and Its Biodiversity Indices in the Danjiangkou Reservoir

TAN Xiang^{1,2}, XIA Xiao-ling¹, CHENG Xiao-li¹, ZHANG Quan-fa¹

(1. Key Laboratory of Aquatic Botany and Watershed Ecology, Wuhan Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430074, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Temporal and spatial patterns of phytoplankton community and their associated influencing factors using canonical correspondence analysis (CCA) were analyzed in the Danjiangkou Reservoir, China. Water quality of the reservoir was also assessed using phytoplankton cell density and biodiversity indices. Results showed that Bacillariophyta and Cyanophyta accounted for 51.08% and 18.39% of all the species, respectively. There was great seasonal variation in phytoplankton assemblage composition, cell density and biodiversity index. In summer, Cyanophyta was dominant and composed of 42.24% of the phytoplankton composition, whereas Bacillariophyta was dominant in spring, summer and winter, and accounted for 77.13%, 61.29% and 50.91% of all species, respectively. The phytoplankton density reached the maximum of 1.76×10^6 cells/L in summer, while the lowest value was 2.32×10^5 cells/L in autumn. Seasonal variability was the same for the indices of Shannon-Wiener, Simpson and Pielou, and they were 2.08, 0.77, 0.65 in autumn, and decreased to 0.85, 0.32, 0.28 in winter, respectively. Though the spatial variability was not significant in indices H' , D , D_m and J , the difference was significant between the Dan and the Han Reservoirs in terms of phytoplankton composition. The dominant phytoplankton was Bacillariophyta in Dan Reservoir and Cyanophyta in Han Reservoir. The results also indicated that conductivity was the main environmental factor influencing variation in phytoplankton composition except in autumn. The reservoir could be classified as oligotrophication by cell density and the middle level between β -mesosaprobic zone and oligosaprobic zone using biodiversity indices. The research demonstrated the potential to use phytoplankton community and its biodiversity indices to monitor water quality in the Danjiangkou Reservoir.

Key words: Danjiangkou Reservoir; phytoplankton; water quality; temporal and spatial patterns; biodiversity indices

众多湖泊、水库尤其是作为饮用水来源的水体的富营养化进程及生态健康状况引起了广泛关注, 通常进行化学及微生物学方面的监测以确保饮用水安全^[1,2], 同时水体生产力的监测包括浮游植物监测逐渐成为了常规监测项目^[3]. 浮游植物是淡水生态系统中重要的初级生产者, 其群落结构的变化会

引起系统中食物网结构的改变, 从而影响淡水生态系统的能量流动、物质循环和信息传递^[4,5]. 淡水

收稿日期: 2010-11-28; 修订日期: 2011-02-17

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31070417)

作者简介: 谭香 (1980 ~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为流域生态学、环境科学, E-mail: xtan@wbgeas.cn

* 通讯联系人, E-mail: qzhang@wbgeas.cn

生态系统中生产和分解的紊乱及富营养化都将最终引起水质的恶化,比如湖泊下层滞水带中氧气的消耗加剧,水体透明度的降低等^[3].此外,浮游植物群落能对环境条件的变化做出复杂而快速的响应,其结构的变化可以被看成是对水质变化的一个很好的指示,从而在水体尤其是湖泊、水库水体监测中起极为重要的作用.

我国人均水资源拥有量少且水资源分布极不均匀^[6].随着人口的增加和经济的不断增长,水资源已成为制约我国尤其是西北及华北地区社会经济可持续发展的最主要的因素之一^[7].2002 年我国开始实施包括西线、中线及东线 3 条线路的南水北调工程.中线工程从丹江口水库引水,重点解决北京、天津、石家庄等沿线 20 多座大城市的缺水问题,因此丹江口水库水质对工程来说十分关键.目前的研究主要集中在水库上游水源区生态环境^[8]及水库水质^[9].随着库区周围地区经济的不断发展,自然和人为因素使入库干、支流水质发生变化^[9],必将影响丹江口水库的水质,进而影响南水北调中线工程生态和社会效益的发挥.本研究是在前期对丹江口水库水质的系统监测的基础上,利用浮游植物群落对水质现状进行综合分析和生态评价,以期为保障和改善丹江口水库水质提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

丹江口水库(32°36'~33°48'N, 110°59'~111°49'E,图1)位于豫、鄂、陕3省交界处,地处汉江干流与其支流丹江交汇处下游0.8 km,控制流域面积 $9.5 \times 10^4 \text{ km}^2$,总库容量达 $408.5 \times 10^8 \text{ t}^{[10]}$.水库于1968年建成,库区成“V”字形,形成丹库和汉库2个库区^[11].水库位于我国北亚热带季风气候区,具有显著的过渡性气候特征.年平均气温15~16℃,无霜期230~250 d^[12].

1.2 采样与分析方法

在丹江口水库选取8个采样点,采样点设置参见文献^[9](图1),分别在2009年4月(春季)、8月(夏季)、11月(秋季)和2010年1月(冬季)进行采样.由于突发事件,2010年1月没有采集到D1样点样品.

浮游植物定性样品的采集采用25号浮游生物网(网孔直径为64 μm),在水面表层呈“∞”字形缓慢捞取浮游植物样品,并将网内浓缩液置于100 mL塑料水样瓶中,现场用鲁哥氏液固定,带回实验室供

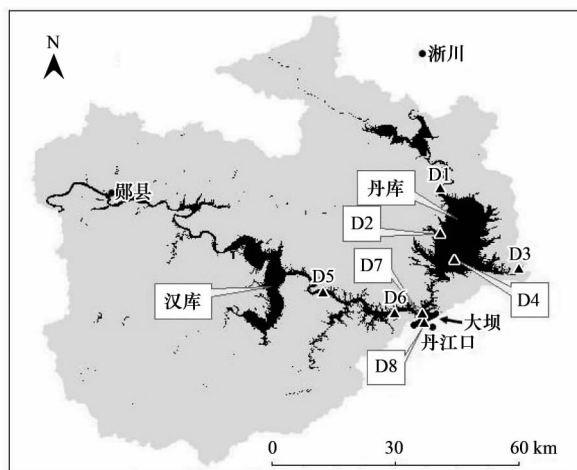


图1 采样点位置示意

Fig. 1 Sampling sites in the Danjiangkou Reservoir, China

镜检用.浮游植物定量样品用有机玻璃采水器采集0.5 m水深处的表层水,取5 L水样置于塑料瓶中,现场用鲁哥氏液固定.样品带回实验室后静置沉降24 h以上,沉淀浓缩后用浮游植物计数框计数.

利用 YSI 6920 (YSI 6920, Multi-Parameter Water Quality Sonde) 现场测定 pH、电导 (EC)、溶解氧 (DO)、氨氮 ($\text{NH}_4^+ \text{-N}$)、硝酸盐氮 ($\text{NO}_3^- \text{-N}$).每个样点采集约 500 mL 水样 1 瓶,分成 2 份,其中 1 份(约 300 mL)加浓硫酸至 $\text{pH} < 2$,带回实验室后测定总氮 (TN)、总磷 (TP) 和高锰酸盐指数等指标.其中总磷的测定采用钼酸铵分光光度法 GB 11893-89,总氮测定采用碱性过硫酸钾紫外分光光度法 GB 11894-89,高锰酸盐指数采用酸性法(与 GB 11892-89 等效),以上方法均参照文献^[13].另一份水样(约 200 mL)经孔径 0.45 μm、直径 47 mm 的 Whatman 硝酸纤维素滤膜过滤后,测可溶性物质.可溶性反应磷 (SRP) 的测定采用钼酸铵分光光度法 GB 11893-89,可溶性二氧化硅 (Si) 采用离子色谱法测定 (Dionex Corporation, Sunnyvale, CA, USA).可溶性总有机碳 (DOC) 由岛津公司 TOC-V CPH + ASI-V 总有机碳分析仪测定, HCO_3^- 采用标准酸甲基橙指示剂滴定法.

1.3 数据处理与分析

1.3.1 多样性分析^[14,15]

(1) 多样性指数

Shannon-Wiener 指数: $H' = - \sum_{i=1}^S p_i \ln p_i$

Simpson 指数: $D = 1 - \sum_{i=1}^S p_i^2$

(2) 丰富度指数

Margalef 指数: $D_m = (S - 1)/\ln N$

(3) 均匀度指数

Pielou 指数: $J = H'/\ln S$

式中, $p_i = n_i/N$, n_i 为 i 种的个体数, N 为所有种类总个体数, S 为物种数. H' 值 0 ~ 1 为重污, 1 ~ 3 为中污(其中 1 ~ 2 为 α -中污, 2 ~ 3 为 β -中污), > 3 为轻污或无污.

1.3.2 统计分析

排序分析方法可以客观有效地揭示群落、物种分布及其与环境因子之间的关系. 本研究中, 先将物种数据进行除趋势对应分析 (detrended correspondence analysis, DCA), 4 个排序轴中梯度长度 (length of gradient) 最大值超过 4, 因此本研究选择单峰模型排序. 采用的排序分析方法为典型对应分析 (canonical correspondence analysis, CCA), 变量的重要性及显著性采用 Monte-Carlo 置换检验来进行检验, 以 $P < 0.01$ 作为显著性标准. DCA 和 CCA 都在 CANOCO 软件 (CANOCO Version 4.53) 下完成, 应用 SPSS 16.0 中多重比较方差分析研究生物多样性指数在水库中的空间差异.

2 结果与讨论

2.1 浮游植物群落结构

在 8 个样点 4 次采样中, 鉴定的浮游植物包括硅藻门 (Bacillariophyta)、蓝藻门 (Cyanophyta)、隐藻门 (Cryptophyta)、绿藻门 (Chlorophyta)、甲藻门 (Pyrrophyta)、金藻门 (Chrysophyta) 和裸藻门 (Euglenophyta) 等 7 个门类 (图 2), 共计 60 属 74 种, 包括绿藻 27 属 30 种, 硅藻 17 属 20 种, 蓝藻 7 属 7 种, 甲藻 3 属 3 种, 裸藻 2 属 2 种, 隐藻 2 属 4 种, 金藻 1 属 1 种. 硅藻门占有藻类组成的 51.08%, 其次是蓝藻 (18.39%) (图 2). 隐藻虽在

全年度平均组成中位居第 3, 但仅在冬季 (1 月) 的汉库 D5 点具有很大的密度 (表 3). 郭红娟等^[11] 对丹江口水库浮游植物前期的演变过程进行了研究, 水库蓄水前 (1958 年) 硅藻占总密度的 81% ~ 92.3%, 1987 年坝前为绿藻-蓝藻-硅藻型 (密度占总密度的 78%), 但 1993 年为硅藻-蓝藻-甲藻型 (密度占总密度的 98%). 本研究 (2009 年) 结果表明水库藻类组成再次发生了变化, 硅藻占有所有门类的 51.08%, 水库在其浮游植物组成方面已转变成为硅藻-蓝藻类型.

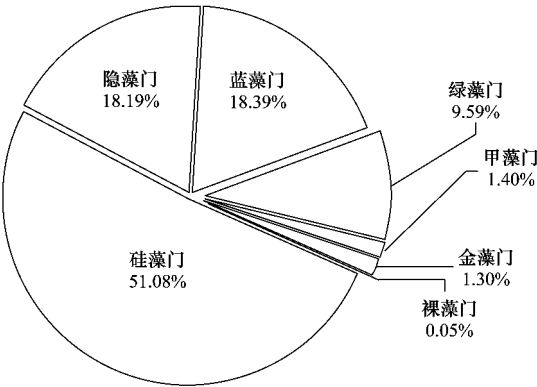


图 2 丹江口水库浮游植物年度平均种类组成
Fig. 2 Phytoplankton composition in the Danjiangkou Reservoir

2.2 浮游植物群落结构的时间动态变化

2.2.1 浮游植物种类组成的季节变化

硅藻、蓝藻、绿藻种类组成的季节变化较大 (表 1), 表现为硅藻种类数在 1 月最多 (17 种), 8 月最少 (12 种); 绿藻种类数在 11 月最大, 达 20 种, 1 月最少, 仅为 12 种. 这种显著的季节性变化, 原因可能为气温高的夏季利于蓝藻和绿藻的生长, 因此蓝绿、藻种类数通常有所上升, 而硅藻的最适生长温度比蓝藻要低^[16].

表 1 丹江口水库浮游植物的种类数

Table 1 Numbers of species of phytoplankton in the Danjiangkou Reservoir

日期	硅藻门	蓝藻门	绿藻门	隐藻门	甲藻门	金藻门	裸藻门	合计
2009 年 4 月	14	3	17	3	2	1	1	41
2009 年 8 月	12	6	17	4	2	1	2	44
2009 年 11 月	16	4	20	4	1	1	1	47
2010 年 1 月	17	2	12	3	1	1	1	37

2.2.2 浮游植物密度季节变动及演变趋势

由图 3 可知, 浮游植物夏季 (8 月) 密度最大, 达 1.76×10^6 cells/L, 其次是冬季 (1 月) 1.62×10^6 cells/L 和春季 (4 月) 8.29×10^5 cells/L, 秋季 (11 月) 浮游植物密度最低, 仅为 2.32×10^5 cells/L. 参照况

琪军等^[17] 利用浮游植物细胞密度评价水质的标准, 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, 丹江口水库秋季水质最好, 为极贫营养水体, 春季为贫营养水体,

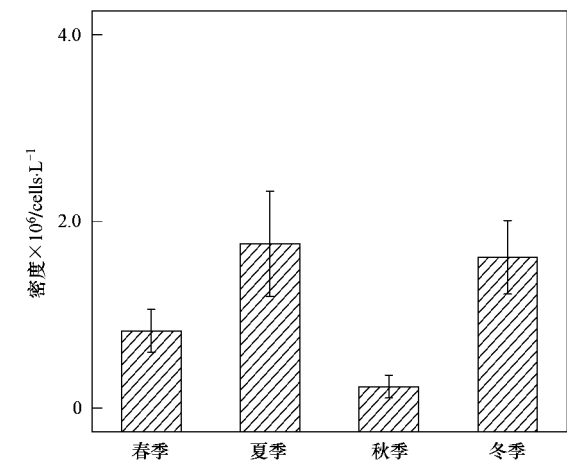


图3 浮游植物密度的时间动态
Fig.3 Temporal dynamic of phytoplankton density

而夏冬季达到贫中营养水平. 丹江口水库全年水质可定为贫营养至贫中营养类型.

丹江口水库浮游植物群落不仅总体密度有季节差异,而且各个门类的密度也随季节变动. 由表2可知,夏季蓝藻门占优势,占藻类总组成的42.24%,密度超过硅藻和绿藻. 原因可能由于蓝藻的DNA与光合作用系统的热稳定性等形成了高温适应机制^[18],蓝藻最适生长温度为25~35℃^[19]高于其他藻类,同时对高温的耐受能力强于其它藻类. 2009年8月采样期间,丹江口水库水温28℃左右,适合蓝藻生长,同时具备了充足的营养盐,蓝藻容易大量繁殖. 研究也表明,蓝藻细胞密度越高,水体富营养化程度也越高^[20]. 而1月采样温度8℃左右,4月水温15℃左右,11月水温13℃左右,此时蓝藻竞争优势低,而硅藻密度占绝对优势. 除夏季外的其他3个季节,硅藻门占优势,春季、秋季和冬季,硅藻门分别占有所有藻类的77.13%、61.29%和50.91%. 而硅藻门为优势类群并占60%以上,水体可判断为寡污带^[21]. 在2010年1月,由于D5(汉库)隐藻门蓝隐藻(*Chroomonas* sp.)密度异常高,使得在该次采样中,隐藻门比例大幅度提高,也导致了年度平均密度中隐藻门的比例大幅度提高,位居第3. 隐藻在10℃水温条件下易成为优势种,这与广东飞来峡水库及新安江水库的研究结果一致^[22].

丹江口水库的浮游植物密度不仅有年度季节变化,比较前期的监测结果发现浮游植物密度也存在明显的演变趋势. 据邬红娟等^[11]报道,1993年浮游植物密度达 4.22×10^5 cells/L. 按照浮游植物密度评价方法^[17],1996年当时水库水质可归为极贫营

养. 而经过十几年的演变,水质营养程度已经提高,从目前的细胞密度(1.11×10^6 cells/L)判断,水质类型已经演变到贫营养(春秋)-中贫营养(夏冬).

表2 浮游植物组成的季节变化/%
Table 2 Temporal variability of the phytoplankton composition in the Danjiangkou Reservoir/%

季节	硅藻门	蓝藻门	绿藻门	隐藻门	甲藻门	金藻门	裸藻门
春季	77.13	2.21	12.85	5.55	0.01	6.92	0.07
夏季	39.25	42.24	11.46	3.65	3.35	0.00	0.06
秋季	61.29	3.69	33.09	1.83	0.03	0.02	0.05
冬季	50.91	0.07	1.85	47.11	0.03	0.00	0.03

2.3 丹江口水库中浮游植物群落的空间分布特点
水库中浮游植物呈现空间分布差异性(表3),丹库(采样点D1、D2、D3、D4)硅藻门占最大比例,而汉库(采样点D5、D6)中,隐藻门在D5藻类组成中所占比例最大,占41.26%,硅藻其次,占26.84%;硅藻和蓝藻在D6均占有相当大的比例,分别为43.94%和31.92%,因此汉库与丹库的藻类组成不同. 丹库和汉库库容相近,但是回水长度和库形有很大差异. 丹江库区水面宽阔、库岸线短,而汉江库区狭长,支流多且库岸线长,接受地表径流带来的外源性营养面广^[11],因而造成浮游植物群落结构和密度差异. CCA排序图(图4)中,丹库样点(D1、D2、D3、D4)和汉库(D5、D6)分别分布于排序轴两侧,这也表明了丹库和汉库浮游植物群落组成的空间差异.

表3 各样点浮游植物密度平均组成百分比/%
Table 3 Annual average composition of phytoplankton density/%

采样点	硅藻门	蓝藻门	绿藻门	隐藻门	甲藻门	金藻门	裸藻门
D1	57.68	14.95	21.42	2.23	3.54	0.18	0.00
D2	67.60	2.20	25.31	3.33	0.70	0.79	0.08
D3	56.60	3.22	19.19	4.70	0.53	15.70	0.07
D4	77.26	1.27	7.74	11.67	1.63	0.43	0.00
D5	26.84	26.01	4.68	41.26	1.15	0.00	0.06
D6	43.94	31.92	11.70	10.15	2.14	0.09	0.06
D7	78.95	10.53	5.30	4.30	0.64	0.26	0.02
D8	74.49	20.76	3.30	1.11	0.17	0.00	0.17
平均	60.42	13.86	12.33	9.84	1.31	2.18	0.06

2.4 水质参数对浮游植物群落格局的影响

表4显示了不同季节浮游植物种类组成与环境因子之间的关系. 首先,影响丹库和汉库浮游植物组成的主要干扰因素不同,丹库的主要影响因素是电导、碳酸氢根等,而汉库更多受磷等营养元素干扰. 其次,不同季节各水化学参数对浮游植物群落的影响的解释力度不同. 春季(4月),第1轴解释了

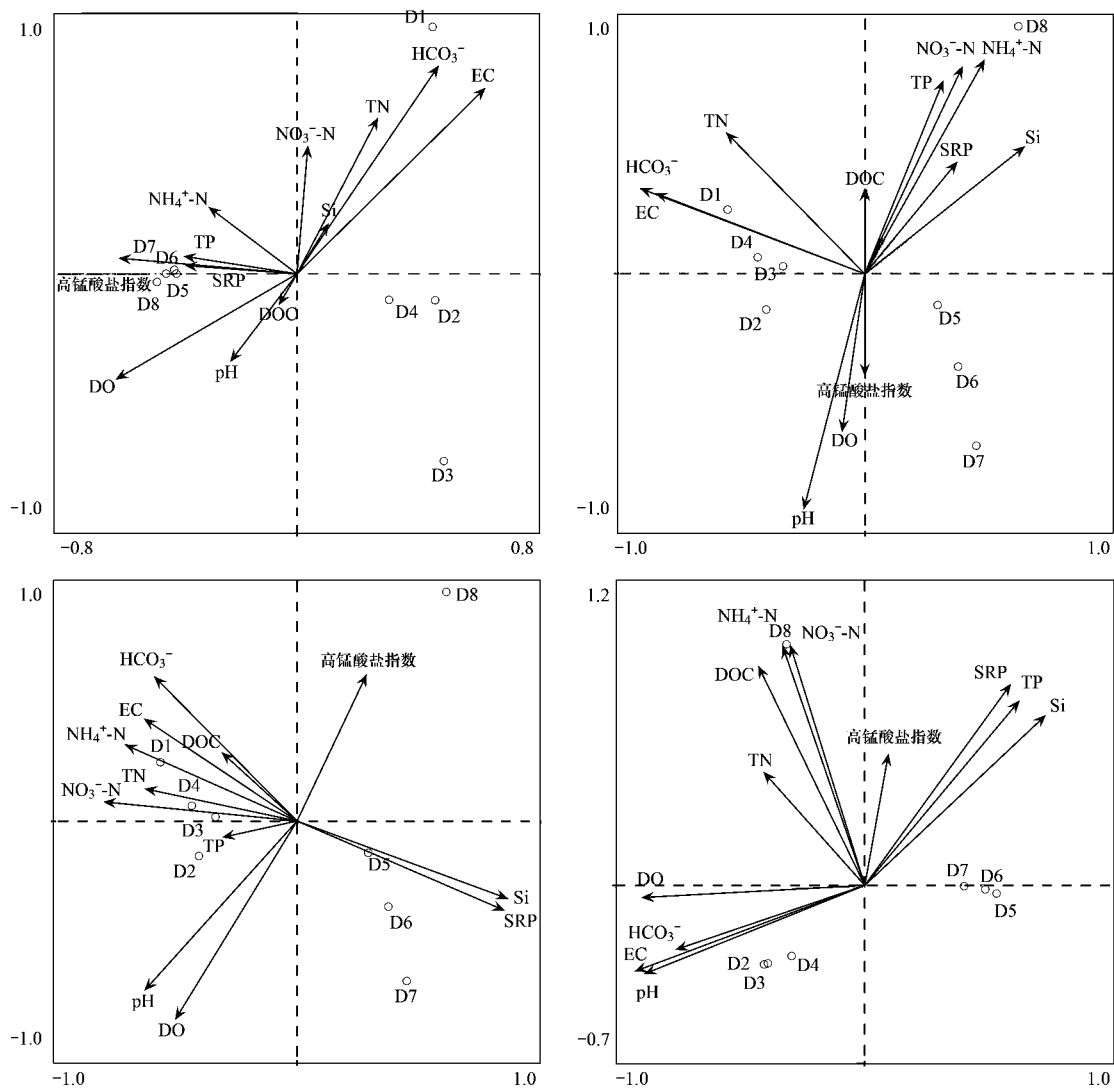


图 4 不同季节浮游植物群落结构与环境变量的典型对应分析图

Fig. 4 Canonical correspondence analysis (CCA) ordination diagrams of phytoplankton in the ordination space of the 1st and 2nd axes

表 4 环境变量与前 2 轴的相关系数

环境变量	春季		夏季		秋季		冬季	
	第 1 轴	第 2 轴	第 1 轴	第 2 轴	第 1 轴	第 2 轴	第 1 轴	第 2 轴
EC	0.622	0.716	-0.904	0.325	-0.63	0.428	-0.928	-0.347
DO	-0.6	-0.409	-0.196	-0.639	-0.501	-0.82	-0.904	-0.051
pH	-0.219	-0.343	-0.249	-0.905	-0.629	-0.7	-0.898	-0.349
NH ₄ ⁺ -N	0.293	0.258	0.486	0.833	-0.711	0.322	-0.329	0.943
NO ₃ ⁻ -N	0.035	0.493	0.392	0.795	-0.795	0.084	-0.299	0.948
高锰酸盐指数	-0.588	0.058	-0.001	-0.408	0.277	0.606	0.097	0.52
TP	0.369	0.031	0.315	0.742	-0.31	-0.067	0.617	0.726
SRP	-0.378	0.07	0.376	0.438	0.858	-0.369	0.586	0.794
DOC	-0.06	-0.121	-0.001	0.325	-0.317	0.296	-0.43	0.869
TN	0.267	0.601	-0.561	0.547	-0.627	0.137	-0.415	0.452
Si	0.11	0.197	0.64	0.488	0.871	-0.323	0.733	0.677
HCO ₃ ⁻	0.471	0.804	-0.868	0.315	-0.596	0.608	-0.767	-0.255
变异解释率 (第 1 轴)/%	52.80		39.20		39.20		53.70	
特征值总量	1.55		1.08		1.08		1.35	

52.8% 的浮游植物变量,其中电导、溶解氧和碳酸氢根离子为最主要的干扰因子,对浮游植物群落结构有重要影响. 夏季(8 月)第 1 轴解释了 39.2% 的浮游植物种类组成,浮游植物群落受电导、碳酸氢根离子的影响;在秋季(11 月)有多种因素干扰浮游植物群落结构,包括可溶性反应磷、溶解性硅及溶解氧等,而冬季为电导、溶解氧、氨氮、硝氮. 除秋季外,电导都为影响水库浮游植物群落的主要干扰因素,氨氮和硝氮仅在冬季也为主要影响因素. 淡水水体中营养盐如氮、磷元素长期以来被认为是与浮游植物生长密切相关,其中磷被广泛认为是淡水浮游植物演替的影响因素^[23]. 但在丹江口水库总磷并非影响浮游植物群落分布的主要驱动力,只在秋季可溶性反应磷为主要因子. 因此,丹江口水库中各种阴阳离子浓度可能是影响浮游植物群落的重要因素.

丹库浮游植物群落结构主要受电导、碳酸氢根等离子浓度的影响,而阴阳离子是电导的主要贡献因素之一. 离子强度反映上游流域岩石风化及人类活动强度^[9];随着工业发展及人类活动加剧,降雨对丹江口库区及其上游流域地区水化学组成的影响将逐渐显现出来^[9],因此加强酸雨控制有利于保持

自然水体正常碱性水平,同时减轻岩石风化强度,降低酸性物质进入水体,进而促进水库浮游植物多样性及水生态健康. 汉库浮游植物则更多受磷等营养元素干扰,汉库岸线狭长,污染物受纳面积相对宽阔,因此需注意控制加强库区及汉江上游流域的面源污染,合理规划农业土地利用,尽量减少化肥施用量等,有利于控制营养元素流入汉库,对于减轻汉库营养水平有重要意义. 对上游受污染小流域的河岸植被带的恢复和重建研究也有利于丹江口水库水生态系统健康.

3 浮游植物群落的多样性分析

3.1 多样性指数的季节变化及其相关性分析

群落结构的季节变化可能导致多样性指数、均匀度指数等产生相应的变化. 除 Margalef(D_m) 指数外,其他 3 个指数变化趋势均一致,秋季、夏季、春季到冬季依次减小(图 5). Shannon-Wiener 指数(H')、Simpson 指数(D)、Pielou 指数(J)秋季都达到最大,分别为 2.08、0.77 和 0.65;在冬季值最小,依次为 0.85、0.32 和 0.28. 而 Margalef 指数(D_m)秋季最大,值为 6.69,春季值最小为 3.25. 对

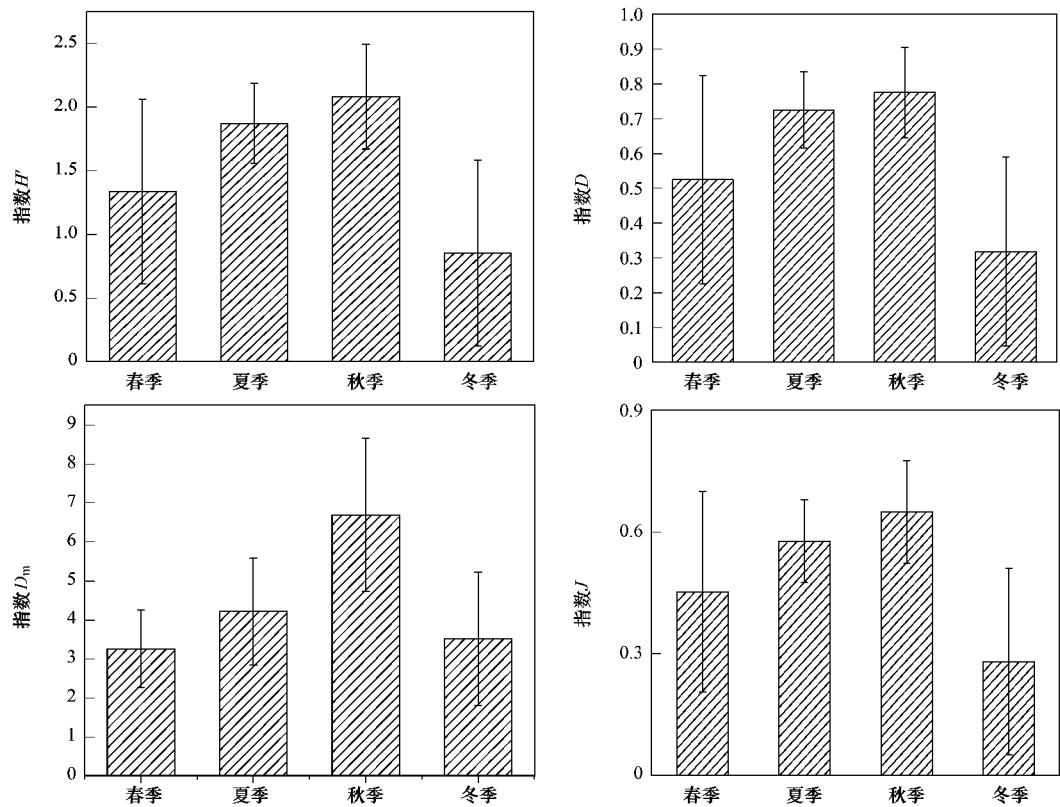


图 5 多样性指数的季节变化
Fig. 5 Seasonal variation of biodiversity indices

4 个季节中的 8 个采样点进行的指数间相关分析研究表明,Shannon-Wiener 指数 H' 与 Simpson 指数 D , Shannon-Wiener 指数 H' 与 Pielou 指数 J 的相关性系数达 0.981 4、0.983 1,而 H' 与 D_m 的相关系数 $R^2 < 0.5$. 由此可以推测,丹江口水库物种多样性指数的变动,可能更多的是由于群落均匀度的变动而不是由于种类数的变化,即物种丰富度的变化. 张婷等^[24]在湖北省熊河水库的研究也得出类似结论.

3.2 多样性指数的空间分布

8 个采样点的 4 个多样性指数的年度平均值见表 5. 对结果进行了方差分析-多重比较 (ANOVA-multiple comparison), 不同位点之间多样性指数的差异不显著. 坝上 (D7) 和坝下 (D8) 采样点间多样性指数也没有显著差异,因此本研究认为丹江口水库生物多样性指数不存在显著的空间差异,相似的结果也发现在临近的其他水库^[24].

表 5 丹江口水库浮游植物多样性指数 (H' 、 D)、丰富度指数 (D_m) 和均匀度指数 (J) 的年平均值

Table 5 Diversity indices (H' , D), abundance index (D_m) and evenness index (J) of phytoplankton in the Danjiangkou Reservoir				
采样点	H'	D	D_m	J
D1	1.35 ± 0.73	0.53 ± 0.31	3.70 ± 0.80	0.43 ± 0.24
D2	1.72 ± 0.90	0.64 ± 0.35	5.01 ± 1.53	0.53 ± 0.27
D3	1.60 ± 0.82	0.63 ± 0.32	4.24 ± 1.94	0.51 ± 0.24
D4	1.49 ± 0.68	0.60 ± 0.26	3.96 ± 1.41	0.49 ± 0.25
D5	1.28 ± 0.82	0.49 ± 0.31	3.69 ± 2.65	0.42 ± 0.26
D6	1.38 ± 0.82	0.51 ± 0.31	4.57 ± 3.67	0.44 ± 0.24
D7	1.59 ± 0.87	0.59 ± 0.32	5.58 ± 2.62	0.50 ± 0.26
D8	1.89 ± 0.78	0.70 ± 0.25	4.58 ± 1.47	0.59 ± 0.23

3.3 生物多样性指数评价

浮游植物的多样性指数是判断湖泊水库营养状况最常用的检测指标^[17]. H' 和 D_m 评价标准是: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,群落所包含的信息量也越大,稳定性越大,水质越好;多样性指数减小,群落结构趋于简单,稳定性变差,水质下降. 丹江口水库秋季 4 个指数都达到最大值,其中 H' 为 2.08, D_m 为 6.69. 根据水质评价标准^[17],秋季水体洁净度提高,从 H' 值判断达到中污染,从 D_m 判断,达到清洁. 因此,在秋季丹江口水库水质状况最好.

表 5 显示了各个采样点的多样性指数, H' 为 1.28 ~ 1.89, D_m 为 3.69 ~ 5.58, 参照水质评价标准^[17]由 H' 判断,为中污染;由 D_m 判断, β -中污染至清洁. 根据指示性浮游植物群落评价标准^[25],丹江口水库为 β -中污染水体. 丹江口水库各样点的水

质营养状况虽略有差异,但整体水平为中污染带至清洁之间. 而从细胞密度判断,水库水质为贫营养水平. 综合本研究的水质评价结果及他人的评价结果,丹江口水库整体上说为 β -中污染或贫营养水平.

4 结论

(1) 丹江口水库浮游植物群落的优势种群为硅藻,占总密度的 51.08%,而绿藻种类数在各门类中最多. 浮游植物群落结构有显著的季节性,在春季、秋季和冬季,硅藻在数量上占绝对优势,夏季蓝藻取代硅藻的位置,在群落组成中占 42.24%,同时在夏季浮游植物密度最高. 与前期的研究结果比较发现,从 1958 年建坝前到 2010 年,50 年间水库浮游植物群落发生了显著变化,从硅藻型水库逐步转变到硅藻-蓝藻型水库.

(2) 浮游植物群落在丹江口水库具有显著的空间分布特征. 丹库 (D1、D2、D3、D4) 浮游植物组成均为硅藻门占最大比例,而在汉库 (D5、D6) 蓝藻和隐藻种群数量较高,硅藻所占比例比丹库及坝上坝下 2 采样点低.

(3) 环境与浮游植物直接的典型对应分析表明,不同季节各类环境因子对浮游植物群落的影响和对群落分布的解释力度有所不同. 除秋季外,电导是影响丹江口浮游植物群落分布的主要驱动力.

(4) Shannon-Wiener 指数 H' 、Simpson 指数 D 、Pielou 指数 J 季节变化趋势均一致,秋季、夏季、春季到冬季依次减小,多样性指数、丰富度指数及均匀度指数没有显著空间差异. 从多样性指数来看,水体介于 β -中污染带到寡污染带之间;而利用细胞密度评价显示,水库水质为贫营养水平.

参考文献:

[1] Cabecinha E, Cortes R, Cabral J A, *et al.* Multi-scale approach using phytoplankton as a first step towards the definition of the ecological status of reservoirs[J]. Ecological Indicators, 2009, **9** (2): 240-255.

[2] Matthews R, Hilles M, Pelletier G. Determining trophic state in Lake Whatcom, Washington (USA), a soft water lake exhibiting seasonal nitrogen limitation [J]. Hydrobiologia, 2002, **468** (1-3): 107-121.

[3] Karadžić V, Subakov-Simić G, Krizmanić J, *et al.* Phytoplankton and eutrophication development in the water supply reservoirs Garaši and Bukulja (Serbia) [J]. Desalination, 2010, **255** (1-3): 91-96.

[4] 李敦海, 李根宝, 王高鸿, 等. 水华蓝藻生物质对沉水植物五刺金鱼藻生长的影响 [J]. 水生生物学报, 2007, **31** (5): 689-

- 692.
- [5] 张婷,宋立荣.铜绿微囊藻(*Microcystis aelltgittosu*)与三种丝状蓝藻间的相互作用[J].湖泊科学,2006,18(2):150-156.
- [6] 李思悦,张全发.对南水北调工程解决中国北方用水问题的分析[J].人民黄河,2005,27(8):28-29,43.
- [7] Shao M, Tang X Y, Zhang Y H, *et al.* City clusters in China: air and surface water pollution [J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2006, 4(7):353-361.
- [8] 汪兴中,蔡庆华,李凤清,等.南水北调中线水源区溪流大型底栖动物群落结构的时空动态[J].应用与环境生物学报,2009,15(6):803-807.
- [9] 李思悦,程晓莉,顾胜,等.南水北调中线水源地丹江口水库水化学特征研究[J].环境科学,2008,29(8):2111-2116.
- [10] 徐黎,李光华.南水北调中线工程源头生态环境的综合治理[J].华北水利水电学院学报,2003,24(2):74-77.
- [11] 郭红娟,彭建华,韩德举,等.丹江口水库浮游植物及其演变[J].湖泊科学,1996,8(1):41-50.
- [12] 李思悦,张全发.南水北调中线丹江口库区主要生态环境问题及植被恢复[J].中国农村水利水电,2008,(3):124.
- [13] 国家环境保护总局.水和废水监测分析方法[M].(第四版).北京:中国环境科学出版社,2002.
- [14] Belaoussoff S, Kevan P G, Murphy S, *et al.* Assessing tillage disturbance on assemblages of ground beetles (*Coleoptera: Carabidae*) by using a range of ecological indices [J]. *Biodiversity and Conservation*, 2003, 12(5):851-882.
- [15] Hunter P R, Gaston M A. Numerical index of the discriminatory ability of typing systems: an application of Simpson's index of diversity[J]. *Journal of Clinical Microbiology*, 1988, 26(11):2465-2466.
- [16] 郑凌凌.汉江硅藻水华优势种生理生态学研究[D].福州:福建师范大学,2005.
- [17] 况琪军,马沛明,胡征宇,等.湖泊富营养化的藻类生物学评价与治理研究进展[J].安全与环境学报,2005,4(2):87~91.
- [18] 郑维发,曾昭琪.淡水蓝藻的高温适应[J].湖泊科学,1994,4:356-363.
- [19] Nalewajko C, Murphy T P. Effects of temperature and availability of nitrogen and phosphorus on the abundance of *Anabaena* and *Microcystis* in Lake Biwa, Japan: an experimental approach [J]. *Limnology*, 2001, 2(1):45-48.
- [20] 王朝晖,林秋奇,胡韧,等.广东省水库的蓝藻污染状况与水质评价[J].热带亚热带植物学报,2004,12(2):117-123.
- [21] 郭沛涌,林育嘉,李玉仙.东平湖浮游植物与水质评价[J].海洋湖沼通报,1997,(4):37-42.
- [22] 何国全,雷腊梅,韩博平.亚热带河流型水库浮游植物群落的变化:以广东飞来峡水库为例[J].热带亚热带植物学报,2006,14(3):183-189.
- [23] 谭香,沈宏,宋立荣.三种水华蓝藻对不同磷浓度生理响应的比较研究[J].水生生物学报,2007,31(5):693-699.
- [24] 张婷,李林,宋立荣.熊河水库浮游植物群落结构的周年变化[J].生态学报,2009,29(6):2971-2979.
- [25] 李玉英,高宛莉,李家峰,等.南水北调中线水源区浮游植物时空分布及其营养状态[J].生态学杂志,2008,27(1):14-22.