

达里诺尔湖夏季浮游植物群落结构及分布特征

徐琼¹, 贾克力¹, 李文宝¹, 王利明¹, 赵胜男¹, 于瑞雪¹, 杨久辉²

(1. 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018;

2. 赤峰市克旗达里诺尔国家级自然保护区管理处, 赤峰 025386)

摘要:为了探究达里诺尔湖夏季浮游植物群落结构特征及水质状况,对浮游植物的种类组成、多样性及环境理化因子进行监测。2015年夏季在湖区设置9个采样点进行定期采样,通过Shannon-Wiener多样性指数、Pielou均匀度指数等数据处理,结合Pearson相关分析,研究浮游植物群落结构空间分布特征、多样性及其与环境因子的相关性。结果表明,调查期间共发现浮游植物5门、39属、77种;其中绿藻门29种,占总种数37.66%;蓝藻门和硅藻门均有23种,均占29.87%。达里湖夏季浮游植物优势种为3门、14种,主要优势种为单生卵囊藻(*Oocystis solitaria*)、湖生卵囊藻(*Oocystis lacustris*)、不定微囊藻(*Microcystis incerta*)、小球藻(*Chlorella* sp.)和细小隐球藻(*Aphanocapsa elachista*)。浮游植物丰度为 $4.55 \times 10^4 \sim 26.78 \times 10^4$ 个/L,其平均值为:水面下0.5 m(22.46×10^4 个/L) > 1.5 m(20.86×10^4 个/L) > 4.5 m(14.15×10^4 个/L) > 底泥上0.5 m(9.32×10^4 个/L);浮游植物生物量为0.682~6.695 mg/L,垂向变化趋势与浮游植物丰度一致。相关分析表明,夏季达里诺尔湖浮游植物丰度与温度、pH值、溶解氧及叶绿素a呈极显著正相关,与盐度相关性不明显。浮游植物群落Shannon-Wiener指数为3.330~4.452, Pielou指数为0.799~0.912,结合浮游植物丰度、优势种及多样性指数分析结果,达里诺尔湖属于绿藻-蓝藻-硅藻型,且水体处于寡污染水平。

关键词:达里诺尔湖;浮游植物;群落结构;环境因子;夏季

中图分类号:Q145 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2016)06-0014-09

浮游植物是湖泊生态系统的主要初级生产者,也是生态系统中能量流动和物质循环的重要组成部分,在维持水域生态系统平衡中起着极其重要的作用(Chen et al, 2010)。浮游植物群落组成、分布及数量变化受多重因子影响,主要包括外在驱动(如水温、光照强度及水动力条件等)及内在驱动(如营养盐负荷、捕食压力及竞争等)2个方面(Pacheco et al, 2010;李秋华等,2011)。浮游植物种类组成和分布对环境变化具有指示作用,其生物量及群落结构的动态能很好地反映水环境现状及变化,环境条件的改变反过来也会直接或间接影响浮游植物的群落结构(夏品华等,2011);浮游植物作为水环境特征的重要指示生物之一,已引起了广泛关注(Wang et al, 2009;Wei et al,2010)。

达里诺尔湖简称达里湖,位于内蒙古自治区赤

峰市克什克腾旗西部($43^{\circ}12' \sim 43^{\circ}24'N$; $116^{\circ}24' \sim 116^{\circ}56'E$),南临浑善达克沙地,东接贡格尔草原,属中温带大陆型季风气候,是我国北方典型的寒旱区湖泊之一。受季风性气候影响,降水主要集中在夏季6-8月,多年平均降水量为400~500 mm,蒸发量为1500~1600 mm。受太阳辐射影响,四季气候变化较大,7月最热,平均气温为18.8℃,最高温度达38.0℃。湖泊主要补给水源为贡格尔河、沙里河、耗来河等入湖河流及地下水和雨水,蒸发为湖水的主要损耗方式。现有水域面积约188.48 km²,西深东浅,最大水深为9.25 m,平均水深6.70 m。湖水主要偏碱性,pH值为9.53~9.75,年均pH值为9.65;在矿化程度方面,其水体中主要含有Na⁺和K⁺。受湖水盐碱度及pH值等因素影响,湖中鱼种类较少,经济鱼类主要有瓦氏雅罗鱼(*Leuciscus waleckii dybowski*)和鲫(*Carassius auratus*)2种。

达里湖作为内蒙古自治区重要的渔业生产基地,近年来有不少学者对湖区的浮游植物进行了相关研究。李志明等(2007)经过春、夏、秋、冬4次采样(混合水样),得出了湖区浮游植物种类、数量及生物量现状及季节变化趋势;缪丽梅等(2013)利用多年的调查资料对湖区的水质和生物资源量进行了

收稿日期:2015-12-22

基金项目:国家自然科学基金(51339002;51469025);中国博士后科学基金(2014M562495XB);自治区级创新团队资助。

作者简介:徐琼,1991年生,女,硕士研究生,研究方向为水环境科学与工程。E-mail: xuqiong91@126.com

通信作者:贾克力。E-mail: kelijia58@126.com

监测及评价。目前,国内对深水湖泊浮游植物研究较为鲜见,对深水湖泊富营养化及“水华”发生机制主要集中在浮游植物随季节和湖泊不同生态特征区的变化(Nalewajko et al, 2001; Ruano et al, 2005);缺乏对浮游植物群落垂直分布规律的研究,尤其缺少对藻类光合作用过程中一些重要参数的测定。水体 pH 值与藻类生长关系密切,藻类光合作用吸收 CO₂,引起水体 pH 值升高,其呼吸作用产生的 CO₂溶于水中促进 H⁺的生成,导致 pH 值下降;水体酸碱度也会影响藻类的生长,碱性环境有利于藻类光合作用。因此,研究高寒干旱区碱性深水湖泊垂向浮游植物群落结构特征和理化因子变化,对探究深水湖泊水生生态系统结构具有重要意义。本文在气温最高的夏季展开调查,围绕达里湖浮游植物种类组成、丰度、生物量、多样性的水平及垂向变化以及浮游植物种类与环境因子的关系展开研究,旨在为达里湖水资源利用与水环境保护提供生物学依据,同时也为我国湖泊生态学研究积累基础资料。

1 材料与方 法

1.1 采样时间与点位布设

依据达里湖的面积和水深(表 1)、形状特征及入湖河口位置等情况,结合项目研究目的,采用全球定位系统,对达里湖区内取样点进行定位,共计设置 9 个采样点位,如图 1 所示。取样点的布设依据项目原有点位设定,结合湖泊实际情况,将经纬度进行网格划分,取十字交叉点,从北到南依次标记为 A、B、C、D、E,从西到东依次标为 1、2、3...7;其中 A7、E1、E2 依据河口位置布设,其他站点依据达里湖水深变化及湖区年均风向等因素布设。样本于 2015 年夏季月份中旬采集。

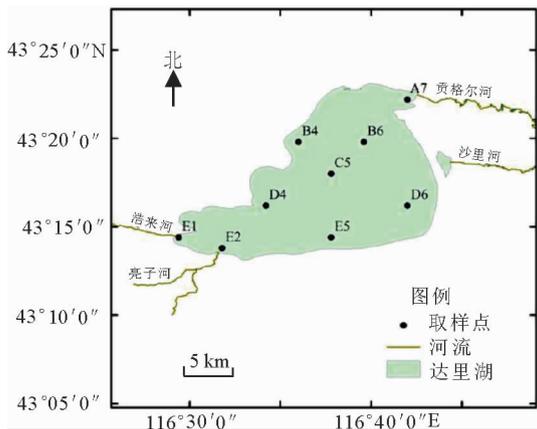


图 1 达里湖采样点位

Fig. 1 Location of sampling sites in Dalinor Lake

表 1 达里湖采样点实测水深

Tab. 1 Water depth at each sampling site in Dalinor Lake

取样点	A7	B4	B6	C5	D4	D6	E1	E2	E5
水深/m	1.20	6.70	7.50	8.50	0.75	7.50	9.50	8.90	9.00

1.2 样本采集与分析方法

1.2.1 浮游植物 浮游植物样本采集参照《湖泊生态调查观测与分析》(黄祥飞等,1999)。水深 2 m 以内水团混合良好的水体,只采集水面下 0.5 m 处水样;水深 3 ~ 10 m 的水体,分别采集水面下 0.5 m、1.5 m、4.5 m 及底泥上 0.5 m 处水样。通过有机玻璃采水器,各层分别采集 1 000 mL 水样,现场加入 15 mL 鲁哥试剂固定浮游植物定量样品。浮游植物定性样品用 25 号浮游生物网划“∞”形捞取,经 1% 福尔马林溶液保存,用于种类鉴定和分析。

浮游植物定量样品带回实验室后在筒形分液漏斗内静置 24 h,浓缩至 30 mL,随机抽取 0.1 mL 浓缩样品在光学显微镜(OLYMPUS BX41;400×)下进行镜检计数,每个样本重复计数 2 次,每次观测 100 个视野,取平均值作统计结果,当 2 次计数结果相差在 ±15% 以上,则进行第 3 次计数,取个数相近 2 次的平均值作为统计结果。浮游植物种类鉴定参考相关文献(周凤霞和陈剑虹,2005;胡鸿钧和魏印心,2006)。

由于浮游植物的个体体积较小,通常是根据浮游植物自身比重近似于水比重的特征,假定浮游植物密度为 1,然后按照浮游植物个体形态分成几个最为接近的几何部分,直接参照某些常见浮游植物体积的估算值,最后计算浮游植物的生物量。

1.2.2 水质指标 现场使用塞氏盘测定透明度(SD);采用便携式设备(SG-ELK 系列)测定水温(T)、盐度(SAT)、pH 值、溶解氧(DO)等水质参数,另采集上述样点分层水样带回实验室,进行总氮(TN)、总磷(TP)、化学需氧量(COD_{Cr})、叶绿素(Chl-a)等指标的测定,测定方法均参照《水和废水监测分析方法》(国家环境保护总局,2002)进行。

1.3 数据处理与统计分析

应用 Shannon-Wiener 多样性指数(H)(Shannon,1948)、Pielou 均匀度指数(J)(Pielou,1969)及优势度(Y)(Lampitt et al, 1993)指数描述浮游植物群落特征,计算公式如下:

$$H = - \sum_{i=1}^S P_i \log_2 P_i \quad (1)$$

$$J = \frac{H}{\log_2 S} \quad (2)$$

$$P_i = \frac{n_i}{N} \quad (3)$$

$$Y = P_i \times f_i \quad (4)$$

式中: P_i 为第 i 种个体数量占总个体数量的比例; S 为测点中浮游植物总种数; n_i 为测点中第 i 种的个数; N 为测点中浮游植物总个数; f_i 为第 i 种在各测点出现的频率。当浮游植物的优势度 $Y \geq 0.02$ 时, 该种即为优势种。

采用 ArcGIS10.0 统计模块作为空间分析工具, 以克里金插值方法进行区域插值, 对浮游植物丰度、生物量、多样性指数及均匀度等进行空间分布趋势模拟。应用 SPSS19.0 进行数据差异性分析和 Pearson 相关性分析。

2 结果

2.1 水质指标的垂向变化

达里湖夏季理化指标的垂向变化如表 2 所示。随水深增加, 水温 (T) 逐渐降低, 水面下 0.5 m 与底泥上 0.5 m 相差 1.51℃, 水温均值为 21.20℃, 空间变异系数为 2.73%; pH 值从水面下 0.5 m (9.799) 减小为底泥上 0.5 m (9.711), 均值为 9.752, 空间变

表 2 达里湖水质指标的垂向变化

Tab. 2 Vertical variation of environmental parameters in Dalinor Lake

WD/m	T/℃	pH	DO/ mg · L ⁻¹	SAT/ mg · L ⁻¹	TN/ mg · L ⁻¹	TP/ mg · L ⁻¹	COD _{Cr} / mg · L ⁻¹	Chl-a/ mg · L ⁻¹
水面下 0.5	21.94 ± 0.74	9.799 ± 0.12	7.608 ± 0.17	5.646 ± 0.08	3.094 ± 1.15	1.738 ± 0.02	69.061 ± 5.03	0.552 ± 0.23
水面下 1.5	21.33 ± 0.67	9.770 ± 0.12	7.566 ± 0.14	5.674 ± 0.03	2.458 ± 0.75	1.720 ± 0.07	71.660 ± 7.56	0.455 ± 0.14
水面下 4.5	20.91 ± 0.62	9.730 ± 0.12	7.449 ± 0.17	5.704 ± 0.04	2.189 ± 0.63	1.763 ± 0.05	65.921 ± 3.57	0.268 ± 0.09
底泥上 0.5	20.43 ± 1.04	9.711 ± 0.19	7.334 ± 0.18	5.622 ± 0.09	3.132 ± 1.09	1.800 ± 0.07	67.192 ± 8.65	0.179 ± 0.11

2.2 浮游植物种类及组成

通过检测共鉴定出浮游植物 5 门、39 属、77 种; 其中绿藻门 (Chlorophyta) 种类最多, 为 16 属、29 种, 占 37.66%; 其次为硅藻门 (Bacillariophyta) 11 属、23 种, 占 29.87%; 蓝藻门 (Cyanophyta) 10 属、23 种, 占 29.87%; 隐藻门 (Cryptophyta) 和黄藻门 (Anthrophyta) 均为 1 属、1 种, 共 2.60%。

各采样点浮游植物种类为 23 ~ 64 种, 平均值为 43 种, 空间变异系数为 5.64%。从图 2 可看出, 主要以绿藻门、蓝藻门和硅藻门为主。B4 点浮游植物种类最多, 为 64 种; B6 点次之, 为 57 种; 靠近南岸的 E1、E2 及 E5 点种类数基本一致, 分别为 43、41、40 种; 水深较浅的 A7 和 D4 点种类较少, 仅仅有 23 种和 25 种。

浮游植物种类组成随水深表现出一定的趋势 (图 3)。各层主要以蓝藻和绿藻为主, 水面下 0.5 m

异系数为 0.35%; 垂向溶解氧 (DO) 逐步变小, 底泥上 0.5 m 与水面下 0.5 m 相差 0.273 mg/L, 平均值为 7.489 mg/L, 空间变异系数为 1.42%; 垂向盐度 (SAT) 从水面下 0.5 m (5.646 mg/L) 增大为 4.5 m (5.704 mg/L), 底泥上 0.5 m 减为最小值 5.622 mg/L, 均值为 5.662 mg/L, 空间变异系数为 0.54%。

达里湖夏季营养盐的垂向分布表现为随着水深增加, 总氮 (TN) 浓度从 3.094 mg/L 减为 2.189 mg/L, 底泥上 0.5 m 增大为 3.132 mg/L, 均值为 2.718 mg/L, 空间变异系数为 15.00%; 总磷 (TP) 浓度在底泥上 0.5 m 达到最大值 1.800 mg/L, 在水面下 1.5 m 达到最小值 (1.720 mg/L), 均值为 1.755 mg/L, 空间变异系数为 1.70%。化学需氧量 (COD_{Cr}) 在水面下 1.5 m 处最大 (71.660 mg/L), 在 4.5 m 处最小 (65.921 mg/L), 均值为 68.458 mg/L, 空间变异系数为 3.15%。

叶绿素 a (Chl-a) 作为表征水体初级生产力的指标, 随水深逐步变小, 水面下 0.5 m 是底泥上 0.5 m 的 1.03 倍, 均值为 0.363 mg/L, 空间变异系数较大, 为 40.55%。

蓝藻门和绿藻门共占总数 90%, 蓝藻门居多; 水面下 1.5 m 处, 蓝藻门和绿藻门各占 45%; 水面下 4.5 m 处绿藻门较丰富, 占 47%; 底泥上 0.5 m 处硅藻门有所增多, 蓝藻门、绿藻门和硅藻门各占 42%、36% 和 22%。

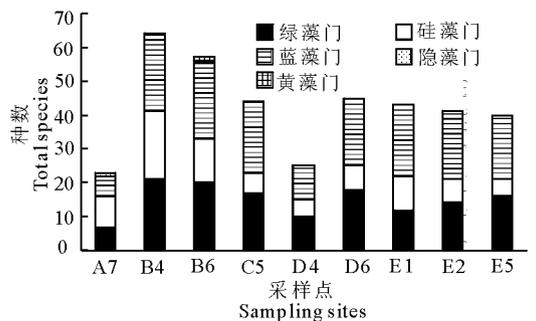


图 2 达里湖各采样点浮游植物种类的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of phytoplankton species in Dalinor Lake

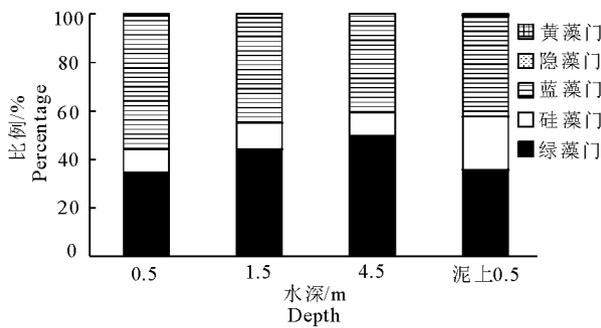


图3 达里湖不同水深的浮游植物组成比例

Fig. 3 Vertical distribution of phytoplankton population in Dalinor Lake

2.3 浮游植物丰度空间分布

水面下0.5 m处浮游植物丰度为 $15.66 \times 10^4 \sim 26.78 \times 10^4$ 个/L, 平均值为 22.46×10^4 个/L, 空间变异系数为 18.25%; 1.5 m处为 $14.15 \times 10^4 \sim 24.25 \times 10^4$ 个/L, 平均值为 20.93×10^4 个/L, 空间变异系数为 18.39%; 水面下0.5 m及1.5 m处浮游植物丰度在水平方向分布不均匀, 但有一定的规律, 湖区西北部和南部均高于湖心区。水面下4.5 m处为 $11.62 \times 10^4 \sim 18.70 \times 10^4$ 个/L, 平均值为 14.08×10^4 个/L, 空间变异系数为 17.70%; 底泥上0.5 m为 $4.55 \times 10^4 \sim 14.65 \times 10^4$ 个/L, 平均值为 8.93×10^4 个/L, 空间变异系数较大为 42.31%。从图5可以看出, 水面下4.5 m及底泥上0.5 m浮游植物丰度分布有相似的规律, 均呈东北向西南递减的趋势。垂向而言, 水面下0.5 m处浮游植物丰度最大, 为 26.78×10^4 个/L; 底泥上0.5 m处浮游植物丰度最小, 为 4.55×10^4 个/L, 随水深的增加, 浮游植物丰度呈现逐步减小的趋势。

2.4 浮游植物生物量的空间分布

水面下0.5 m处浮游植物生物量为 3.916 ~ 6.695 mg/L, 均值为 5.614 mg/L; 1.5 m处的生物量为 3.396 ~ 5.821 mg/L, 均值为 5.024 mg/L。浮游植物生物量水平分布与丰度具有相似性, 湖区北部和南部均高于湖心区, 水面下0.5 m和1.5 m最小生物量均在C5点。水面下4.5 m处浮游植物的生物量为 2.324 ~ 3.739 mg/L, 均值为 2.815 mg/L; 底泥上0.5 m处生物量为 0.682 ~ 2.198 mg/L, 均值为 1.339 mg/L。从图5可看出, 浮游植物生物量水平方向呈东北向西南递减的趋势, 与丰度分布具有一致性(图5)。垂向而言, 水面下0.5 m浮游植物生物量最大, 为 6.695 mg/L, 底泥上0.5 m浮游植物生物量最小, 为 0.682 mg/L, 垂向生物量随水深逐步减少。

2.5 浮游植物群落多样性

群落多样性主要通过物种丰富度和均匀度来体现, 达里湖夏季浮游植物多样性指数(H)为 3.330 ~ 4.452, 均值为 3.920, 空间变异系数为 10.02%; 从图6可以看出, 多样性指数从靠近北岸的A7点增大, 最大值出现在湖西北部B4区域, 为 4.440; 其次为靠近湖中部的B6和C5区域, 分别为 4.399和 4.144; 往湖区南部, 多样性指数逐步减小, 位于东南的E5区域 H 最小, 为 3.330。夏季浮游植物的均匀度指数(J)为 0.799 ~ 0.912, 均值为 0.863, 空间变异系数为 4.39%, 达里湖浮游植物分布较均匀, 除靠近湖中的D4点均匀度值偏高(0.913)外, 其余各采样点的均匀度比较接近。

2.6 浮游植物优势种

根据优势度计算得出达里湖夏季浮游植物优势种为3门、14种(表3), 分别是绿藻门的单生卵囊藻、湖生卵囊藻、小球藻、小球衣藻和球衣藻5种; 蓝藻门的不定微囊藻、细小隐球藻、铜绿聚球藻、不定腔球藻、立方藻、银灰平裂藻和膨胀色球藻7种; 硅藻门的扁圆卵形藻和放射舟形藻2种。其中绿藻门单生卵囊藻和湖生卵囊藻优势度较大, 小球藻和不定微囊藻并列第3位。可见夏季达里湖浮游植物组成为绿藻-蓝藻-硅藻型。

表3 达里湖浮游植物优势种

Tab. 3 Dominant species of phytoplankton in Dalinor Lake

优势种	出现频率/%	优势度
绿藻门(Chlorophyta)		
单生卵囊藻(<i>Oocystis solitaria</i>)	88.89	0.23
湖生卵囊藻(<i>Oocystis lacustris</i>)	88.89	0.18
小球藻(<i>Chlorella</i> sp.)	88.89	0.11
小球衣藻(<i>Chlamydomonas microsphaera</i>)	66.67	0.05
球衣藻(<i>Chlamydomonas globosa</i>)	88.89	0.04
蓝藻门(Cyanophyta)		
不定微囊藻(<i>Microcystis incerta</i>)	66.67	0.11
细小隐球藻(<i>Aphanocapsa elachista</i>)	66.67	0.09
铜绿聚球藻(<i>Synechococcus aeruginosus</i>)	77.78	0.08
不定腔球藻(<i>Coclosphaerium dubium</i>)	66.67	0.08
立方藻(<i>Eucapsis</i> sp.)	77.78	0.06
银灰平裂藻(<i>Merismopedia glauca</i>)	66.67	0.05
膨胀色球藻(<i>Chroococcus turgidus</i>)	66.67	0.05
硅藻门(Bacillariophyta)		
扁圆卵形藻(<i>Cocconeis placentula</i>)	77.78	0.04
放射舟形藻(<i>Navicula radiosa</i>)	77.78	0.04

2.7 浮游植物与环境因子的相关分析

浮游植物丰度与环境因子相关性分析见表4。可见丰度与温度、pH值、溶解氧及叶绿素a浓度呈极显著正相关, 与化学需氧量呈正相关, 与盐度相关性较差, 与总氮及总磷呈线性负相关。

表4 达里湖浮游植物丰度与环境因子相关关系

Tab.4 Correlation between phytoplankton density and environmental variables in Dalinor Lake

因子	T	pH	SAT	DO	Chl-a	TN	TP	COD
丰度	0.987*	0.971*	0.232	0.998**	0.984*	-0.087	-0.943	0.714

注：*表示显著相关($P < 0.05$)；**表示极显著相关($P < 0.01$)。

Note: * indicates a significant difference ($P < 0.05$); ** indicates a highly significant difference ($P < 0.01$).

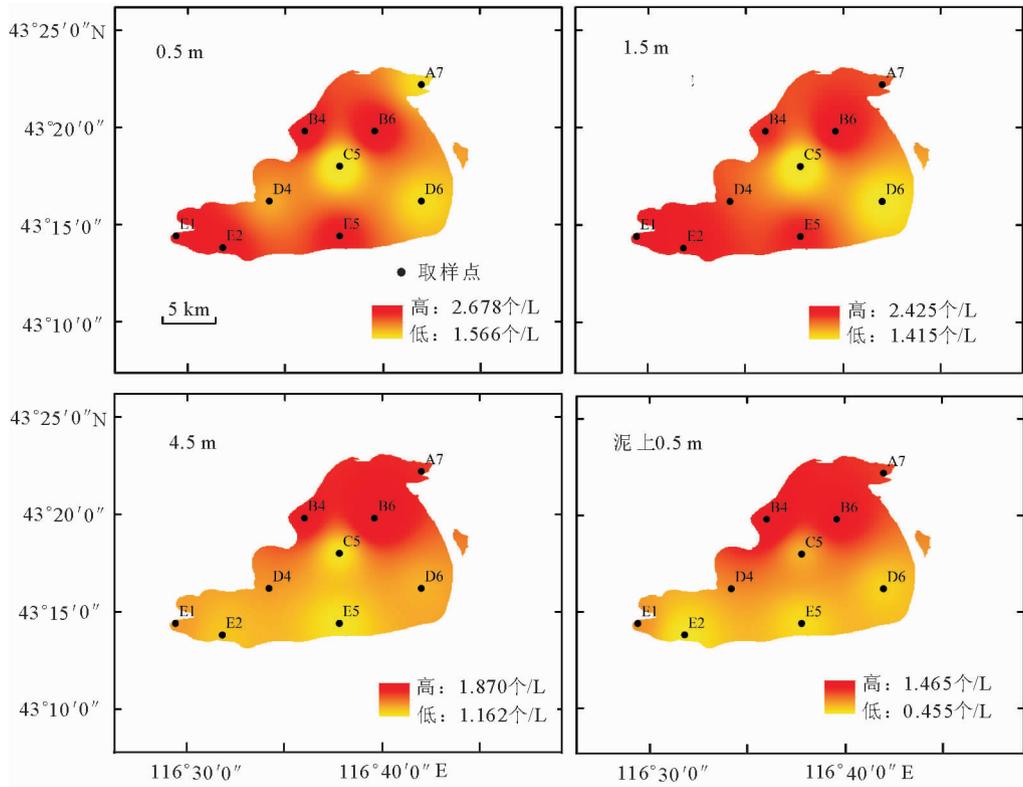


图4 达里湖各采样点浮游植物丰度的空间分布

Fig.4 Spatial distribution of phytoplankton density in Dalinor Lake

3 讨论

3.1 浮游植物群落结构特征

达里湖夏季共检出浮游植物 5 门、39 属、77 种，多于南方长湖 2012 年夏季浮游植物种类数 (7 门、41 属、53 种) (柴毅等, 2014); 少于中国东北查干湖 2012 年浮游植物种类数 (5 门、53 属、127 种) (李然等, 2014)。达里湖属于寒旱区内陆封闭型湖泊，每年 11 月上旬气温下降并开始结冰，直到翌年 4 月下旬气温回升，冰层逐渐融化 (刘志娇, 2015); 以后气温逐渐升高，光照作用增强，有利于绿藻、蓝藻及硅藻的生长 (谭香等, 2011); 此外达里湖偏碱性的水质 (pH 9.65)，符合蓝藻的生长需求；而隐藻和黄藻的最适温度一般要低。达里湖景区每年 6 月开放，随气温升高，7 月水温最高，正值旅游旺季，人类活动一定程度加剧了水体营养化，因此绿藻、蓝藻及硅藻成为主要的优势类群。

浮游植物垂向组成有明显的变化，0.5 m 浮游植物群落组成为蓝藻 - 绿藻 - 硅藻型，到 1.5 m 处，蓝藻和绿藻所占比例相同 (45%)。湖上层阳光充足，水温较高，适合进行光合作用，自然及人为扰动作用有利于浮游藻类的生长繁殖；蓝藻及绿藻都含有叶绿素 a，能进行光合作用，释放氧气；此外蓝藻喜欢强光照和较高的 pH，其通常没有鞭毛，不能运动，依靠垂直搅动保持在水体的光照区 (邓坚, 2012)，所以 0.5 m 处蓝藻所占比例 (55%) 更大一些。4.5 m 处，浮游植物群落组成变为绿藻 - 蓝藻 - 硅藻型，随水深增加，光照变弱，水温降低，溶解氧减少，风力扰动作减弱，一定程度限制营养盐的垂向迁移，可能影响浮游植物的垂向分布。随着深度增加，底泥上 0.5 m 处，浮游植物组成仍以蓝藻、绿藻及硅藻为主，硅藻所占比例有所增大 (20%)。光照随水深减弱，光照强度可能只对某些藻类合适，蓝藻不再成为优势种，具有叶绿素 a 和叶绿素 b 且对光

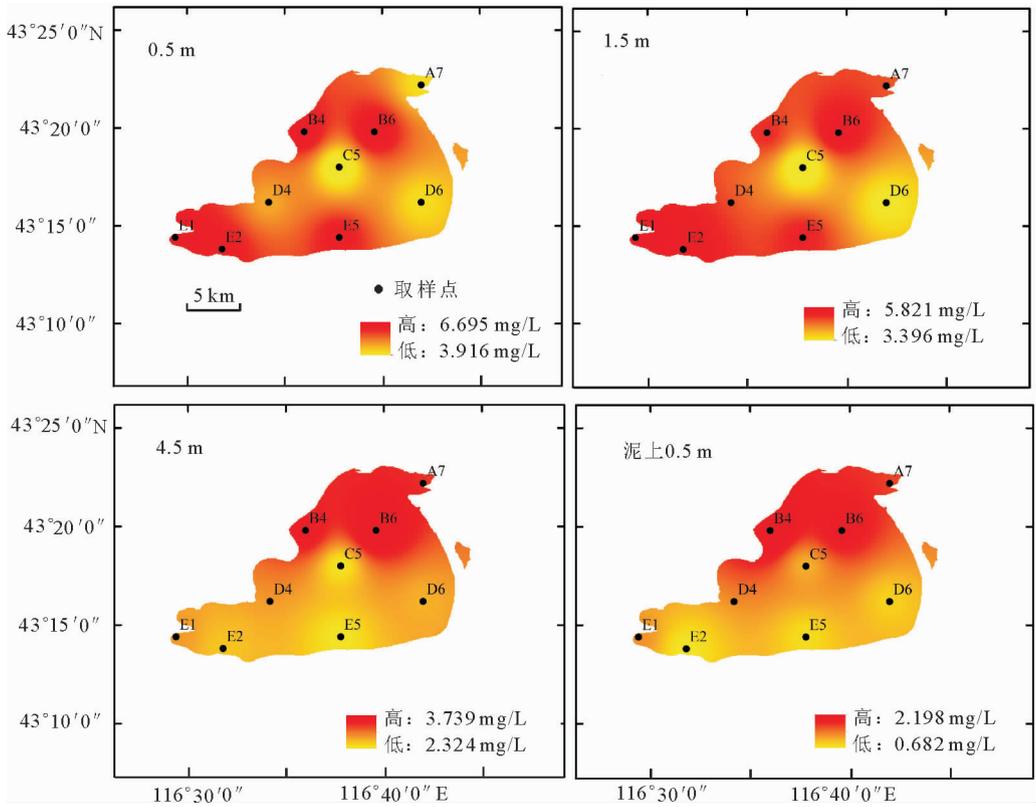


图 5 达里湖各采样点浮游植物生物量的空间分布
Fig. 5 Spatial distribution of phytoplankton biomass in Dalinor Lake

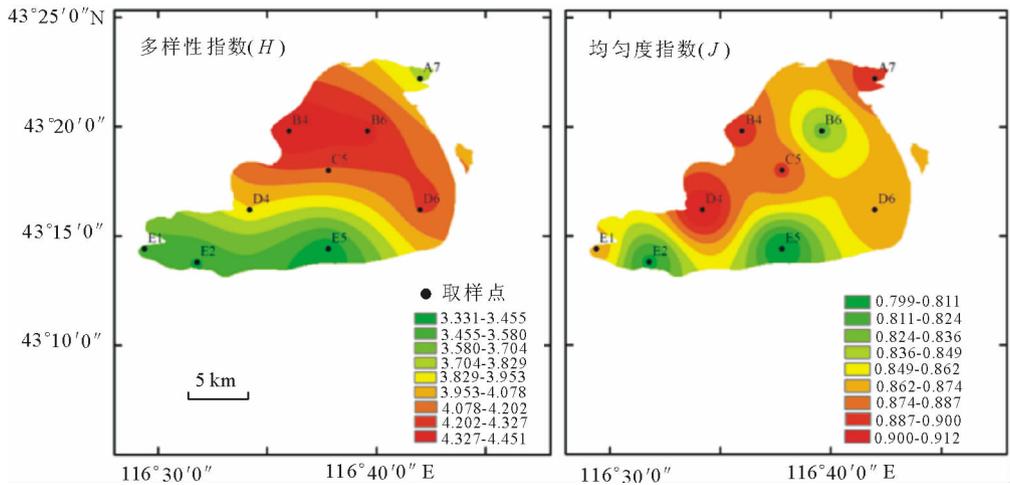


图 6 达里湖浮游植物群落多样性分布
Fig. 6 Spatial distribution of phytoplankton diversity in Dalinor Lake

照没有严格要求的绿藻占优势;各藻门中能运动种类在白天可以移动到湖泊上层进行光合作用,晚间返回暗处吸收营养(邓坚,2012),造成该处分布广、有鞭毛能运动的绿藻及硅藻较多。

本次研究发现,湖区水深较浅的 A7、D4 区域浮游植物丰度相对较少,笔者认为这与湖区该处的水动力条件有直接关系。湖区东北部水深较浅,水流方向与风向基本一致;A7 点水深 1.20 m,受西北风

影响较大,浮游植物的水平分布受水流影响很大(谭香等,2011),较快的水流不利于浮游植物的富集,一定程度使该区域浮游植物数量较少;风力扰动引起的湖流改变垂向浮游植物的种类组成,使该点浮游植物均匀度指数较大。湖中 D4 点处于湖西部高流速区,水深仅为 0.75 m,浮游植物分布受水流和风力作用影响更明显,以上原因可能是导致该区域浮游植物数量较少的主要因素。

3.2 浮游植物群落结构与环境因子的关系

温度是制约浮游植物数量和分布的重要因素(陈菊芳等,2006);浮游植物丰度、生物量均随水温的升高而增加(李然然等,2014)。垂向随水深、光照和太阳辐射减弱,水温降低(1.51℃),浮游植物丰度和生物量减少;浮游植物丰度与DO呈极显著正相关($r=0.998$),随着浮游植物丰度的减小,其光合作用产生的氧气减少,致垂向DO变小(0.273 mg/L);水体pH值与藻类生长有着密切联系,pH与浮游植物丰度正相关($r=0.971$),浮游植物光合作用需要大量的碳源,水中的碳来源于空气中CO₂的溶解,光合作用消耗CO₂,水体向有利于生成H₂CO₃的方向进行,电离产生的H⁺减少,使得水体pH值升高(裴国霞等,2014)。夏季浮游植物大量生长繁殖,对氮、磷等营养盐需求增大。营养盐的形态和含量空间分布受湖泊水体输入及转化过程的影响,致使水体中氮磷含量存在有规律可循的时空变化特征(Gardner et al, 1987; Martin et al, 1999)。湖上层光照充足,水温较高,易受风浪扰动影响,致使氮磷营养盐分布均匀,浮游植物丰度较高;湖下层,风浪扰动作用变弱,影响营养盐的垂向迁移;同时光照、水温等减小,浮游植物丰度逐渐减小。

本次调查发现浮游植物细胞丰度与总氮、总磷呈负相关,由于达里湖水体TN含量较高(2.718 mg/L),N/P较大,当浮游植物对N、P的吸收达到一定程度时,N、P浓度的增加对浮游植物的生长繁殖不再产生作用。底部水和沉积物界面,营养盐除去水体本身以外,在湖泊水体与底质相互作用的过程中,底泥中一部分营养物质会重新释放到水体中(李畅游和史小红,2014),以致底部水体氮磷含量升高。浮游植物生长对氮磷营养盐的需求达到一定程度时,氮磷浓度不再是浮游植物生长的限制因子,从而导致浮游植物丰度与TN、TP出现负相关。

3.3 基于生物多样性的水质生态学评价

物种多样性是衡量群落中物种组成的稳定程度及其数量分布均匀程度和群落结构特征的重要营养指标(姜作发等,2007)。浮游植物生长繁殖对环境条件具有选择性,反过来环境条件的变化也将影响浮游植物的群落结构。多样性指数 H 越大,表明浮游植物群落结构越复杂,稳定性越高,水质越好(郭琦,2014)。在水质生物监测中, $0 < H < 1$ 表示重度污染, $1 < H < 2$ 表示 α -中污染, $2 < H < 3$ 表示 β -中污染, $H > 3$ 表示寡污染(黄祥飞等,1999)。据评价结果,达里湖水水质处于寡污染状态。

4 结论

(1)达里湖夏季水温、pH值、溶解氧、叶绿素a随水深逐步减小。浮游植物丰度与温度、pH值、溶解氧及叶绿素a呈极显著正相关,与总氮及总磷呈线性负相关;

(2)浮游植物绿藻门种类最多(37.66%),蓝藻门及硅藻门(各占29.87%)次之,其中绿藻门的单生卵囊藻和湖生卵囊藻优势度最大,组成为绿藻-蓝藻-硅藻型;

(3)浮游植物受水温及溶解氧影响,随水深增加,丰度和生物量逐步减小;水面下0.5 m和1.5 m处均为湖区西北部和南部高于湖心区;水面下4.5 m及底泥上0.5 m均呈东北向西南递减的趋势;

(4)此次调查时间为夏季,达里湖冬季冰封期较长,水质状况变化大,偏碱性的水体限制了生物多样性,反过来影响水生态,冬季枯水期是今后研究的重点。

参考文献

- 柴毅,彭婷,郭坤,等,2014. 2012年夏季长湖浮游植物群落特征及其与环境因子的关系[J]. 植物生态学报, 38(8):857-867.
- 陈菊芳,齐雨藻,徐宁,等,2006. 大亚湾澳头水域浮游植物群落结构及周年数量动态[J]. 水生生物学报, 30(3):311-317.
- 邓坚,2012. 中国内陆水域常见藻类图谱[M]. 武汉:长江出版社:1-5.
- 郭琦,2014. 金海调蓄水库水质及浮游植物群落结构研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学:44-45.
- 国家环境保护总局,2002. 水和废水监测分析方法(4版)[M]. 北京:中国环境科学出版社.
- 胡鸿钧,魏印心,2006. 中国淡水藻类:系统、分类及生态[M]. 北京:科学出版社.
- 黄祥飞,陈伟民,蔡启铭,1999. 湖泊生态调查观测与分析[M]. 北京:中国标准出版社.
- 姜作发,唐富江,董崇智,等,2007. 黑龙江水系主要江河浮游植物种群结构特征[J]. 吉林农业大学学报, 29(1):53-57.
- 李畅游,史小红,2014. 乌梁素海沉积物环境地球化学特征研究[M]. 北京:科学出版社:41-49.
- 李建茹,李畅游,张生,等,2013. 乌梁素海春季浮游植物群落结构特征分析[J]. 农业环境科学学报, 32(6):1201-1209.
- 李秋华,商立海,李广辉,等,2011. 万峰湖浮游植物群落的时空分布[J]. 生态学杂志, 30(5):1031-1038.

- 李然然,章光新,张蕾,2014. 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, 34(10):2663 - 2673.
- 李志明,安明,李岩平,2007. 达里湖浮游植物调查[J]. 内蒙古农业科技,1(7):210 - 212.
- 刘志娇,2015. 达里诺尔湖水动力条件及氢氧稳定同位素试验研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学:8 - 10.
- 缪丽梅,刘鹏斌,张笑晨,等,2013. 达里湖水质和生物资源量监测及评价[J]. 内蒙古农业科技, (6):53 - 55.
- 裴国霞,郭琦,魏乐,等,2014. 金海水库浮游植物调查及群落结构研究[J]. 水生态学杂志, 35(2):68 - 73.
- 孙军,刘东艳,白洁,等,2004. 2001 年冬季渤海的浮游植物群落结构特征[J]. 中国海洋大学学报:自然科学版, 34(3):413 - 422.
- 谭香,夏小玲,程晓莉,等,2011. 丹江口水库浮游植物群落时空动态及其多样性指数[J]. 环境科学, 22(10):2875 - 2882.
- 夏品华,马健荣,李存雄,等,2011. 红枫湖水库冬春季浮游生物群落与环境因子的典范对应分析[J]. 环境科学研究, 24(4):378 - 386.
- 周凤霞,陈剑虹,2005. 淡水微生物图谱[M]. 北京:化学工业出版社.
- Chen B, Xu Z, Zhou Q, et al, 2010. Long-term changes of phytoplankton community in Xiagu waters of Xiamen, China[J]. Acta Oceanol Sin, 29(6):104 - 114.
- Gardner W S, Nalepa T F, Malczyk J M, 1987. Nitrogen mineralization and denitrification in Lake Michigan sediment [J]. Limnology & Oceanography, 32(6):1226 - 1238.
- Lampitt R S, Wishner K F, Turley C M, et al, 1993. Marine snow studies in the Northeast Atlantic Ocean: Distribution, composition and roles as a food source for migrating plankton[J]. Marine Biology, 116(4):680 - 702.
- Martin T L, Kaushik N K, Trevors J T, et al, 1999. Review: Denitrification in Temperate Climate Riparian Zones [J]. Water Air & Soil Pollution, 111(1/4):171 - 186.
- Nalewajko C, Murphy T P, 2001. 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, 2(1):45 - 48.
- Pacheco J P, Iglesias C, Meerhoff M, et al, 2010. Phytoplankton community structure in five subtropical shallow lakes with different trophic status (Uruguay): a morphology-based approach[J]. Hydrobiologia, 646(1):187 - 197.
- Pielou E C, 1969. An introduction to mathematical ecology [M]. New York: Wiley Interscience.
- Ruano J L G, Rodriguez-Fernandez M M, Fernandez-Ibanez M A, et al, 2005. Short term spatial and temporal variation of phytoplankton in a shallow tropical oligotrophic reservoir, southeast Brazil [M]. Aquatic Biodiversity II. Springer Netherlands: 235 - 247.
- Shannon C E, 1948. A mathematical theory of communication [J]. Bell System Technical Journal, 27:623 - 656.
- Wang Z, Zhao J, Zhang Y, et al, 2009. Phytoplankton community structure and environmental parameters in aquaculture areas of Daya Bay, South China Sea [J]. Journal of Environmental Sciences, 21(9):1268 - 1275.
- Wei Z, Lei W, Zhao L, 2010. Effect of nutrient level on phytoplankton community structure in different water bodies[J]. Journal of Environmental Sciences, (1):32 - 39.

(责任编辑 万月华)

Characteristics of the Summer Phytoplankton Community Structure in Dalinor Lake

XU Qiong¹, JIA Ke-li¹, LI Wen-bao¹, WANG Li-ming¹, ZHAO Sheng-nan¹, YU Rui-xue¹, YANG Jiu-hui²

(1. Water Conservancy and Civil Engineering College, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, P. R. China;

2. National Nature Reserve Ecological Tourism Co., LTD of Ke Shen Ke Teng Dalinuoer, Chifeng 025386, P. R. China)

Abstract: Dalinor Lake, located in Chifeng City, Inner Mongolia, is a typical low salinity lake in the cold, arid region of north China and serves as an important fishery production base for Inner Mongolia. In the summer of 2015, the phytoplankton community structure was investigated at nine sampling sites in Dalinor Lake. Parameters measured included species composition, phytoplankton density and biomass, and the spatial and vertical distribution of phytoplankton. At the same time, environmental parameters were monitored, including Secchi depth transparency (SD), pH, dissolved oxygen (DO), depth, salinity (SAT), water temperature (T), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), chromium chemical oxygen demand (COD_{Cr}) and chlorophyll-a (Chl-a). The spatial distribution characteristics of the phytoplankton community structure, as well as their relation with environmental variables and water quality in Dalinor Lake were analyzed using Pearson correlation analysis and the Shannon-Wiener diversity and Pielou evenness indices. The study aims to provide biological evidence for water resource utilization and conservation. A total of 77 phytoplankton species, belonging to 39 genera and 5 phyla, were identified and Chlorophyta (29 species), Cyanophyta (23 species) and Bacillariophyta (23 species) were dominant, accounting for 37.66%, 29.87% and 29.87% of the total phytoplankton species. The dominant species were *Oocystis solitaria*, *Oocystis lacustris*, *Microcystis incerta*, *Chlorella* sp. and *Aphanocapsa elachista*. The vertical distribution of phytoplankton density and biomass varied significantly. Phytoplankton abundance ranged from 4.55×10^4 to 26.78×10^4 cell/L and the biomass ranged from 0.682 to 6.695 mg/L. The average density of phytoplankton gradually decreased with depth as follows: 22.46×10^4 cell/L (0.5 m), 20.86×10^4 cell/L (1.5 m), 14.15×10^4 cell/L (4.5 m), 9.32×10^4 cell/L (0.5 m above bottom). The water temperature, pH, DO and Chl-a during summer in Dalinor Lake decrease with depth. Pearson analysis showed a significant correlation between phytoplankton density and water temperature, pH, DO and Chl-a, but no obvious correlation with density or salinity. The range of the Shannon-Wiener diversity and Pielou Evenness indices were 3.330–4.452 and 0.799–0.912. Based on phytoplankton abundance, dominant species and diversity indices, the phytoplankton community in Dalinor Lake is of the green/blue-green/diatom type and the water quality status is oligotrophic.

Key words: Dalinor Lake; phytoplankton; community structure; environmental factors; summer