J. Lake Sci.(湖泊科学),2012,**24**(1):117-122
http://www.jlakes.org. E-mail:jlakes@niglas.ac.cn
© 2012 by *Journal of Lake Sciences*

山西宁武亚高山湖群浮游植物群落结构特征*

张俊芳[1],冯　佳[1],谢树莲[1**],王石会[2]
(1:山西大学生命科学学院,太原 030006)
(2:山西管涔山国有林管理局,宁武 036000)

摘　要:通过对山西宁武亚高山湖群浮游植物群落结构的调查研究,共鉴定出浮游植物291个种、变种及变型,隶属于8门,45科,108属.各采样站点间种数相差较大,以马营海种类最多,干海最少.硅藻门、绿藻门和蓝藻门明显占优势,优势科、优势属和优势种也都较为明显.优势种有蓝藻门的细小隐球藻(*Aphanocapsa elachista*)、铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginisa*)和小席藻(*Phormidium tenue*),硅藻门的库津小环藻(*Cyclotella kuetzingii*)、肘状脆杆藻(*Fragilaria ulna*)、尖针杆藻(*Synedra acus*),绿藻门的狭形纤维藻(*Ankistrodesmus angustus*)和小球藻(*Chlorella vulgaris*).浮游植物平均密度为3.49×10^6 cells/L.水面下0.5 m处比水表层的细胞密度高.综合4种生物多样性指数,宁武亚高山湖群水质总体为轻污染.
关键词:浮游植物;群落结构特征;宁武亚高山湖群

Characteristics of phytoplankton community structures in Ningwu subalpine lakes, Shanxi Province

ZHANG Junfang[1], FENG Jia[1], XIE Shulian[1] & WANG Shihui[2]
(1: *School of Life Science, Shanxi University, Taiyuan* 030006, *P. R. China*)
(2: *Forestry Administration of Guancen Mountains in Shanxi, Ningwu* 036000, *P. R. China*)

Abstract: The phytoplankton community structures in Ningwu subalpine lakes have been studied and 291 taxa, belonging to 8 divisions, 45 families and 108 genera, have been identified. The species numbers of each sampling station are quite different. The most abundant species are occurred in Lake Mayinghai, and the least in Lake Ganhai. Bacillariophyta, Chlorophyta and Cyanophyta dominate the area, in addition, dominant families, dominant genera and dominant species are also relatively clear. There are 8 dominant species and they are *Aphanocapsa elachista*, *Microcystis aeruginosa*, *Phormidium tenue*, *Cyclotella kuetzingii*, *Fragilaria ulna*, *Synedra acus*, *Ankistrodesmus angustus* and *Chlorella vulgaris*. The average phytoplankton cell density is 3.49×10^6 cells/L in the lakes. The cell density in 0.5 m depth was higher than that on the surface. The initially assessment by four biodiversity indexes is that the water quality in Ningwu subalpine lakes is light-polluted.
Keywords: Phytoplankton; community structure characteristics; Ningwu subalpine lakes

浮游植物是水生生态系统的重要组成部分,是水环境中的初级生产者和食物链的基础环节,其群落结构的变化是反映水环境质量的重要指标,被广泛用来评价、监测和预报水质状况.其中生物多样性指数法,因其较系统地显示了生物群落的结构组成,同时又反映了生物群落与水质的关系,因而被普遍采用.通常情况下,生物多样性指数越高,其群落结构越复杂,稳定性越高,水质越清洁.当水体受到污染时,敏感型种类大量消失,多样性指数减小,群落结构趋于简单,稳定性变差,水质下降[1].

与平原湖泊相比,亚高山湖泊有不同的生态特点.由于条件所限,对亚高山湖泊的研究还较为薄弱.但是,亚高山湖泊对全球气候变化和人为干扰特别敏感,即便是轻微的环境变化也足以显著地影响亚高山湖

* 国家自然科学基金项目(30970187、30770162)资助.2011-01-24收稿;2011-04-13收修改稿.张俊芳,女,1983年生,硕士;E-mail:zjf2003316034@163.com.
** 通信作者;E-mail:xiesl@sxu.edu.cn.

泊的物理和化学特性,引起物种组成和生物量的变化,改变水生生物体内微量物质的积累[2],因此,可以作为很好的研究体系.

在过去的几十年,随着人类活动的不断扩展,亚高山湖泊受污染物,如酸和营养物质等的影响已越来越严重,因而亚高山湖泊在生物多样性调查方面的研究日益受到重视[3-7].

宁武亚高山湖群,位于山西省宁武县西南 20 km 的东庄村附近,海拔 1771 ~ 1854 m,总面积达53 km^2,蓄水量 $8 \times 10^6 m^3$,包括大小天然湖泊 15 个(有的已干涸),最大的为马营海(天池),面积约 0.8 km^2,最大水深 10 m,其次是公海(亦称元池或玄池),面积 0.36 km^2,最大水深 12 m,其它水体相对较小,石咀头水体呈沼泽状. 该区域属温带大陆性气候,冬季漫长,气候寒冷,多大风,无霜期短,严寒多雪,夏季凉爽,雨量充沛(集中于 7－8 月),春秋季短暂,温差大,年平均气温 －11℃左右,7 月最暖,平均温度 14℃,年降水量900 mm. 该湖群地处黄河水系汾河源头与海河水系恢河源头的分岭地带,是中国三大亚高山湖群之一,也是华北地区唯一的湖群[8]. 有关该湖群浮游植物的研究还未见系统报道. 本文对该湖群浮游植物的群落结构、现存量及生物多样性进行调查,以期为该地区浮游植物资源多样性的研究和保护提供科学依据.

表 1 宁武亚高山湖群浮游植物采样点位置

Tab. 1 Sampling sites of phytoplankton in Ningwu subalpine lakes

采样点	海拔/m	水温/℃	pH
暖泉沟水库(38°51′17″N, 112°14′31″E)	1771	6 ~ 24	6.5 ~ 7.0
马营海(38°52′50″N, 112°14′24″E)	1778	5 ~ 23	7.0 ~ 7.5
琵琶海(38°51′16″N, 112°12′24″E)	1780	5 ~ 24	7.0
干海(38°52′3″N, 112°13′15″E)	1790	5 ~ 25	7.0
石咀头(38°13′12″N, 112°15′11″E)	1791	5 ~ 25	7.0 ~ 7.5
小海(38°51′32″N, 112°12′55″E)	1848	4 ~ 23	7.0
公海(38°53′42″N, 112°14′6″E)	1854	4 ~ 22	7.0 ~ 7.5

1 研究区域和方法

1.1 研究区域

2007 年 8 月至 2009 年 5 月间,共采集 5 次,采样时间分别为 2007 年 8 月、2008 年 10 月、2009 年 5 月、8 月和 10 月. 根据宁武亚高山湖群的地理位置和实际情况共设置马营海、公海、琵琶海、小海、干海、石咀头和暖泉沟水库等采样点(表 1).

1.2 样品的采集与处理

定性样品用 25# 浮游生物采集网以 20 ~ 30 cm/s 的速度于水面下“∞”状循回拖动大约 2 min,将水样收集于贴有标签的标本瓶中,加入 4% 的甲醛固定. 定量样品用有机玻璃采水器分别于表层和 0.5 m 深处各采集水样 500 ml,加入 15% 鲁哥氏液固定. 依据有关文献进行种类鉴定和定量分析[9-20].

1.3 生物多样性指数分析

浮游植物多样性采用 Shannon-Wiener 多样性指数(H')、Pielou 均匀度指数(J)、Margalef 多样性指数(H)和 Simpson 多样性指数(D)进行分析[21].

Shannon-Wiener 多样性指数计算公式为:$H' = -\sum_{i=1}^{S} P_i \lg P_i$,式中,$P_i = N_i/N$,$N_i$表示第 i 种浮游植物个体数,N 表示浮游植物总个体数,S 为采集样品中浮游植物总种类数. H'为 0 ~ 1 时水体重污染;1 ~ 2 为 α-中污染;2 ~ 3 为 β-中污染; >3 为轻污染或无污染.

Pielou 均匀度指数(J)计算公式为:$J = H'/\lg S$,J 值为 0 ~ 0.3 时为重污染;0.3 ~ 0.5 为中污染;0.5 ~ 0.8 为轻污染或无污染.

Margalef 多样性指数计算公式为:$H = (S-1)/\lg N$,$H > 5$ 时,水体清洁;$H > 4$ 时,水体轻污染;$H > 3$ 时,水体中污染;$H < 3$ 时,水体重污染.

Simpson 多样性指数计算公式为:$D = 1 - \sum_{i=1}^{S} P_i^2$,$D$ 越高,表明群落丰富度越高.

2 结果与分析

2.1 浮游植物群落结构

在宁武亚高山湖群的浮游植物调查中,共鉴定出浮游植物 291 种、变种及变型,隶属于 8 门,45 科,108

属,以硅藻门(53.95%)、绿藻门(26.12%)和蓝藻门(12.37%)为主,其它门种类较少(表2).

7个点位中,以马营海的浮游植物种类数最多,为143种,其次是琵琶海,84种,干海种类数最少,仅为18种.各点位均以硅藻、绿藻和蓝藻门种类数占优势(图1).

表2 宁武亚高山湖群浮游植物种类组成

Tab.2 Species composition of phytoplankton in Ningwu subalpine lakes

	绿藻门	蓝藻门	隐藻门	裸藻门	黄藻门	甲藻门	硅藻门	金藻门	合计
科	19	7	1	1	3	3	10	1	45
属	44	24	2	2	4	3	28	1	108
种	76	36	4	7	5	3	157	3	291
种数/%	26.12	12.37	1.37	2.41	1.72	1.03	53.95	1.03	100

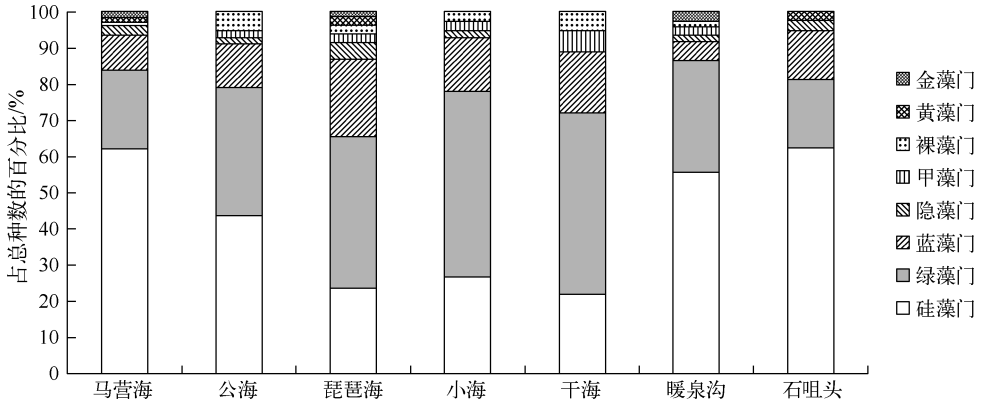

图1 宁武亚高山湖群各点位不同门类所占百分比

Fig.1 The percentage of different divisions at each sampling site in Ningwu subalpine lakes

2.2 浮游植物优势类群

将浮游植物以≥4属的科定为优势科.宁武亚高山湖群的优势科现象较为明显,其中含有4属以上的有9科,仅占总科数的20%,却含有53属,占总属数的49.07%(表3).

表3 宁武亚高山湖群浮游植物优势科

Tab.3 The dominant families of phytoplankton in Ningwu subalpine lakes

优势科	属数	占总属数的百分比/%
小球藻科 Chlorellaceae	7	6.48
卵囊藻科 Oocystaceae	7	6.48
栅藻科 Scenedesmaceae	4	3.70
丝藻科 Ulothricaceae	5	4.63
色球藻科 Chroococcaceae	10	9.26
颤藻科 Oscillatoriaceae	5	4.63
圆筛藻科 Coscinodiscaceae	4	3.70
脆杆藻科 Fragilariaceae	5	4.63
舟形藻科 Naviculaceae	6	5.56
总计9科(占总科数的20%)	53	49.07

将浮游植物以≥16种的属定为优势属.该研究区域的优势属现象也较为明显,其中含有16种以上的有3属,这3属仅占总属数的2.78%,却含有76种,占总种数的26.12%(表4).

运用浮游植物优势度指数来进行优势种计算,公式为:$Y = n_i \times f_i / N$,式中,f_i为该种在各样品中的出现频率[22].取$Y \geq 0.02$为优势种,得出宁武亚高山湖群浮游植物优势种为8种,分别为蓝藻门的细小隐球藻(*Aphanocapsa elachista*)、铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)、小席藻(*Phormidium tenue*);硅藻门的库津小环藻(*Cyclotella kuetzingii*)、肘状脆杆藻(*Fragilaria ulna*)、尖针杆藻(*Synedra acus*);绿藻门的狭形纤维藻(*Ankistrodesmus angustus*)、小球藻(*Chlorella vulgaris*).

表4 宁武亚高山湖群浮游植物优势属
Tab. 4 The dominant genera of phytoplankton in Ningwu subalpine lakes

优势属	种数	占总种数的百分比/%
脆杆藻属 *Fragilaria*	16	5.50
舟形藻属 *Navicula*	40	13.75
桥弯藻属 *Cymbella*	20	6.87
总计3属(占总属数的2.78%)	76	26.12

表5 宁武亚高山湖群浮游植物细胞密度($\times 10^6$ cells/L)
Tab. 5 Cell density of phytoplankton in Ningwu subalpine lakes

采样点	0 m	0.5 m	均值
马营海	1.23	1.28	1.26
公海	0.41	0.75	0.58
琵琶海	10.38	15.03	12.71
小海	0.48	–	0.48
暖泉沟水库	2.93	1.89	2.41
均值	2.88	4.74	3.49

表6 宁武亚高山湖群浮游植物多样性指数
Tab. 6 The diversity index of phytoplankton in Ningwu subalpine lakes

采样点	H'	J	H	D
马营海	2.37	0.64	4.42	0.82
公海	2.93	0.80	4.67	0.92
琵琶海	2.84	0.72	4.82	0.89
小海	2.04	0.64	5.50	0.78
暖泉沟水库	2.76	0.68	2.92	0.89
均值	2.59	0.70	4.46	0.86

2.3 浮游植物细胞密度

由于干海和石咀头站点的水位较浅,水量不稳定,故定量调查只包括其它5个站点.结果表明,浮游植物平均细胞密度为3.49×10^6 cells/L.其中,琵琶海平均细胞密度最高,为12.71×10^6 cells/L,小海最低,为0.48×10^6 cells/L.表层处的平均细胞密度为2.88×10^6 cells/L,湖面下0.5 m处的平均细胞密度为4.74×10^6 cells/L.总体来看,0.5 m处比表层处的细胞密度高(表5).

2.4 浮游植物多样性指数

宁武亚高山湖群浮游植物Shannon-Wiener多样性指数H'显示为β-中污染;Pielou均匀度指数J显示各物种分布均匀,水质为轻污染或无污染;Margalef多样性指数H显示群落结构稳定,水质为轻污染;Simpson多样性指数D较高,表明物种丰富度高.综合4种多样性指数初步判断宁武亚高山湖群水质为轻污染(表6).

各站点间多样性指数比较发现,公海的H'、J和D均最高,说明该站点的浮游植物种类丰富,并且分布均匀,群落结构最稳定;H显示暖泉沟为重污染,小海为清洁,其它均为轻污染(表6).

3 讨论

3.1 宁武亚高山湖群浮游植物群落结构组成分析

宁武亚高山湖群浮游植物共8门,45科,108属,291种、变种及变型.硅藻门、绿藻门和蓝藻门为优势门,优势科、优势属和优势种也都较为明显,表明该区域的浮游植物群落类型丰富,区系组成复杂.各站点间种数差异较大,以马营海的种数最多,为143种,而干海的种数仅18种.这是由于浮游植物生长受多种环境因素的影响,其分布也是各种因素综合作用的结果.马营海是该湖群中面积最大的湖泊,由于管理较好,周围农牧等人为污染相对较少,因此水体透明度较高,水质较好,浮游植物丰富度也较高.而干海水域面积小,水体很浅,干旱季节近乎沼泽.各湖泊水体相对独立,具有各自的微环境.受各自环境因子综合作用的结果,不同站点浮游植物的群落结构组成变化比较复杂,显现出明显差异.

通过与其它一些湖泊的研究报道比较可知,亚高山湖泊与低海拔或平原水体在浮游植物群落结构组成上有明显区别.如同为亚高山湖泊的云南抚仙湖,海拔高达1722.5 m,浮游植物以硅藻门占优势[23-24].而同属山西省位于太原盆地的晋阳湖,海拔仅800 m,浮游植物则以绿藻门为优势类群[25].可见亚高山湖泊在浮游植物群落结构组成方面有自身的特点.

3.2 宁武亚高山湖群浮游植物现存量及生物多样性分析

浮游植物是鱼类的天然饵料,其细胞密度的丰欠对鱼类等湖泊中的动物有重要的影响.另外,浮游植物

细胞密度一定程度上能反映该水域的营养类型. 按照有关评价湖泊富营养化标准,藻类细胞数量小于 3×10^6 cells/L为贫营养型, $3\times10^6\sim10\times10^6$ cells/L 为中营养型,大于 10×10^6 cells/L 为富营养型[18],宁武亚高山湖群水体为中营养型.

综合 4 种浮游植物多样性指数的结果,宁武亚高山湖群整体水质为轻污染. 其中,公海水质最好,暖泉沟污染程度最大. 这可能是由于公海相对偏远,受到的人为干扰较少,而且该水体海拔较高,几乎为封闭性湖泊,只靠降水及地下水的补给,与外界水体几乎无交换,自成一个独立的生态系统,相对而言,群落结构也较稳定. 暖泉沟水库海拔相对较低,交通便利,为开放性水体,主要靠小东沟河水补给,有一定的生活污水排入,加上最近几年由于旅游业的开发,受人类活动影响比其他几个湖泊大,水质有向富营养型湖泊发展的趋势. 为了景区的持续发展,应进一步加强旺季的水质管理.

生物多样性指数显示在环境因素特别是水质理化性质影响到物种生存的时候,多样性能够反映水质状况,而在环境因素对物种的生存没有重要影响的时候,多样性更多地反映物种间的竞争. 因此,在使用多样性判断水质时,首先应该了解影响该水体生物多样性的因素,然后综合理化性质等其他指标再作分析和比较[26-27].

总体而言,宁武亚高山湖群虽水质较好,但近年来,由于温室效应的影响,全球温度升高,使得该水体蒸发速度加快,地下水位下降,有的水域面积较小的湖泊已经枯竭,应引起有关部门重视. 要保护好这片高山明镜,必须采取一些措施,如引水、加强水质监测、减少畜牧粪便及人为污染等. 总之,必须对该水体采取“以防为主,综合治理”的科学管理方针.

致谢:李博、李强、李贤煜和陈乐等同志参加野外采集工作,特此致谢.

4 参考文献

[1] 梅 洪, 赵先富, 郭 斌等. 中国淡水藻类生物多样性研究进展. 生态科学, 2003, **22**(4): 356-359.

[2] Tolotti M, Manca M, Angeli N *et al*. Phytoplankton and zooplankton associations in a set of alpine high altitude lakes: geographic distribution and ecology. *Hydrobiologia*, 2006, **562**: 99-122.

[3] Rott E. Some aspects of the seasonal distribution of flagellates in mountain lakes. *Hydrobiologia*, 1988, **161**: 159-170.

[4] Reynolds CS, Jaworski GHM, Roscoe JV *et al*. Responses of the phytoplankton to a deliberate attempt to raise the trophic status of an acidic, oligotrophic mountain lake. *Hydrobiologia*, 1998, **369/370**: 127-131.

[5] Parson MJ, Parker BC. Seasonal pattern of ammonium(methylamine) uptake by phytoplankton in an oligotrophic lake. *Hydrobiologia*, 1993, **250**: 105-117.

[6] Hausmann S, Pienitz R. Seasonal water chemistry and diatom changes in six boreal lakes of the Laurentian Mountains (Que′bec, Canada): impacts of climate and timber harvesting. *Hydrobiologia*, 2009, **635**: 1-14.

[7] Bonilla S, Rautio M, Vincen WF. Phytoplankton and phytobenthos pigment strategies: implications for algal survival in the changing Arctic. *Polar Biology*, 2009, **32**: 1293-1303.

[8] 朱大岗, 孟宪刚, 邵兆刚等. 山西宁武地区高山湖泊全新世湖相地层划分及干海组的建立. 地质通报, 2006, **25**(11): 1303-1310.

[9] 胡鸿钧, 魏印心. 中国淡水藻类——系统、分类及生态. 北京: 科学出版社, 2006.

[10] 朱浩然. 中国淡水藻志(第二卷)——色球藻纲. 北京: 科学出版社, 1991.

[11] 齐雨藻. 中国淡水藻志(第四卷)——中心纲. 北京: 科学出版社, 1995.

[12] 黎尚豪, 毕列爵. 中国淡水藻志(第五卷)——丝藻目, 石莼目, 胶毛藻目, 桔色藻目, 环藻目. 北京: 科学出版社, 1998.

[13] 施之新. 中国淡水藻志(第六卷)——裸藻门. 北京: 科学出版社, 1999.

[14] 魏印心. 中国淡水藻志(第七卷)——中带鼓藻科, 鼓藻科(1). 北京: 科学出版社, 2003.

[15] 毕列爵, 胡征宇. 中国淡水藻志(第八卷)——绿球藻目(上). 北京: 科学出版社, 2005.

[16] 朱浩然. 中国淡水藻志(第九卷)——藻殖段纲. 北京: 科学出版社, 2007.

[17] 齐雨藻, 李家英. 中国淡水藻志(第十卷)——羽纹纲. 北京: 科学出版社, 2004.

[18] 王全喜. 中国淡水藻志(第十一卷)——黄藻门. 北京: 科学出版社, 2007.

[19] 施之新. 中国淡水藻志(第十二卷)——异极藻科. 北京: 科学出版社, 2004.

[20] 李家英, 齐雨藻. 中国淡水藻志(第十四卷)——舟形藻科(1). 北京: 科学出版社, 2010.
[21] 沈韫芬, 章宗涉, 龚循矩等. 微型生物监测技术. 北京: 中国建筑工业出版社, 1990.
[22] 罗民波, 陆健健, 王云龙. 东海浮游植物数量分布与优势种. 生态学报, 2007, **27**(12): 5076-5085.
[23] 潘继征, 熊 飞, 李文朝等. 抚仙湖浮游植物群落结构、分布及其影响因子. 生态学报, 2009, **29**(10): 5376-5385.
[24] 李荫玺, 王 林, 祁云宽等. 抚仙湖浮游植物发展趋势分析. 湖泊科学, 2007, **19**(2): 223-226.
[25] 郭春燕, 冯 佳, 谢树莲. 山西晋阳湖浮游藻类分布的时空格局及水质分析. 湖泊科学, 2010, **22**(2): 251-255.
[26] 孙嘉龙, 董泽琴, 瞿丽雅等. 贵州万峰湖浮游植物的调查及其指数评价. 安徽农业科学, 2008, **36**(23): 10096-10097.
[27] 张良璞. 巢湖藻类群落多样性分析. 生物学杂志, 2007, **24**(6): 53-72.