

从时空异质性看东湖富营养化中原生动物的演替

吴生桂*, 沈韞芬

(中国科学院水生生物研究所, 武汉 430072)

摘要:1993-08~1994-08, 东湖原生动物年均丰度为 59.391 ind./L, 年均生物量为 1.40 mg/L。从 V 站到 0 站, 随着营养水平(TSI)增加, 数量(A)和生物量(B)显著增加; $\text{Ln}A = -58.323 + 16.503 \text{Ln}TSI (n=5, r=0.983, p=0.003)$; $\text{Ln}B = -16.840 + 0.256 \text{Ln}TSI (n=5, r=0.996, p<0.001)$, 两者均表现出明显的空间异质性。同时, 丰度的周年动态模式也发生了明显演替, 原来的春季和秋季高峰演变为冬季高峰, 营养水平越高, 冬季高峰越明显, 随营养水平增加形成的原生动物群落结构—种类组成和现存量—的空间格局与年代变化趋势一致。

关键词: 东湖; 原生动物; 空间异质性; 演替

On the protozoan succession from the viewpoint of temporal and spatial heterogeneity in eutrophic Donghu Lake

WU Sheng-Gui, SHEN Yun-Fen (Institute of Hydrobiology, The Chinese Academy of Sciences, Wuhan, 430072, China)

Abstract: The spatial heterogeneity of the standing crop of protozoa in Lake Donghu was observed during 1993-08-1994-08. The annual mean abundance of protozoa was 59.391 ind./L, and the biomass was 1.40 mg/L. With the increase of the trophic levels(TSI), there was an obvious increase both in abundance(A) and biomass(B) of protozoa. The succession of the annual dynamic model of protozoan abundance was found, the higher the trophic level, the higher peak in winter. The horizontal spatial pattern of protozoan community structure had a same trend with long-term changes caused by trophic levels in Donghu Lake.

Key words: Donghu Lake; protozoa; temporal and spatial heterogeneity; succession

文章编号: 1000-0933(2001)03-0446-06 中图分类号: Q178.1 文献标识码: A

湖沼学研究^[1,2], 人工富营养化实验及不同营养级湖泊^[3]中浮游生物比较均表明原生动物现存量一般随富营养化而增加。但国内外有关富营养化造成原生动物现存量长期变化的研究报道并不多。

武汉东湖的浮游动物 60 年代初就有研究^[4]。80 年以来, 越来越严重的水污染使生态环境发生了明显改变。尽管东湖生态系统试验站建立后, 对浮游动物群落结构进行了长期监测^[5,6], 但有关原生动物群落结构及其演替尚没有系统而详尽的报道。

1993 年 8 月至 1994 年 8 月, 作者对东湖不同营养水平的 5 个站位的原生动物时空异质性进行了研究, 同时比较了不同年代的原生动物群落结构, 分析了其演替规律, 以期开展生物操纵提供科学的理论依据。

1 材料与方法

1.1 采样站的设置

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(项目编号 39470144)

* 通讯联系人, 地址: 水利部、中国科学院水库渔业研究所, 武汉, 430079。

收稿日期: 1999-03-20, 修订日期: 1999-10-09

作者简介: 吴生桂(1962~), 男, 湖北潜江人, 博士, 研究员。主要从事淡水生态学、环境生态学研究。

武汉东湖是长江中下游的一个中型浅水性湖泊,流域面积 187km²,20.5m 水位面积为 27.9km²,最大深度 4.75m,平均水深 2.21m,年平均气温 18.3℃,年均水温 18.5℃。60 年代末全湖由人工堤分隔成 7 个大小不同的子湖。本项工作在东湖两个主要湖区按水体营养水平^[7]从高到低设置 0、I、II、III、V 5 个采样站(图 1)。按同期测得透明度和叶绿素含量计算,湖水营养状况指数从 0 站到 V 站依次为 71、68、64.5、61 和 57。60~90 年代 II 站 T-N 浓度分别为 0.526、0.883、1.825 和 2.245mg/L。

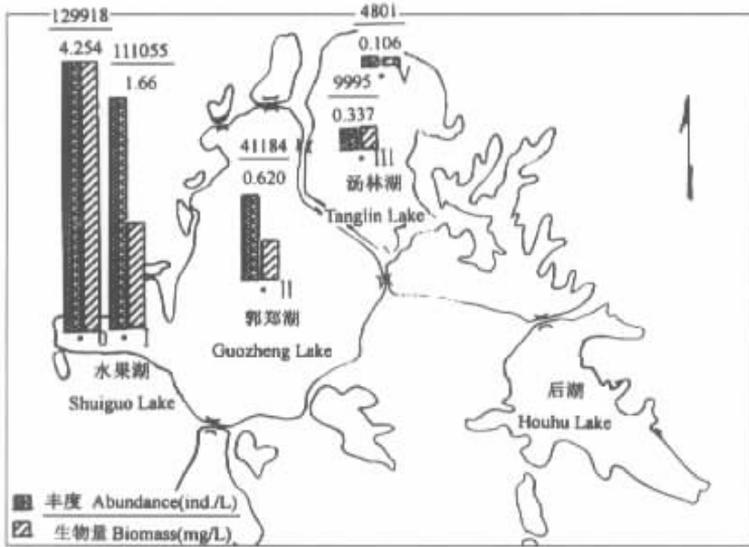


图 1 东湖原生动物的丰度(ind./L)和生物量(mg/L)的水平格局(1993-08~1994-08)

Fig. 1 Horizontal pattern of abundance(ind./L)and biomass(mg/L)of protozoa in Donghu Lake(1993-08~1994-08)

1.2 样品的采集、处理与计数

1993 年 8 月至 1994 年 8 月,每月月初和月中各采集 1 次。采样层及采水量根据各站水深及原生动物的丰度确定(表 1)。样品均系全水水样,采集、处理及计数按常规方法。计数数量过多时,以适当比例稀释。生物量的测定按体积法^[8]。

2 结果

2.1 从水平空间格局看原生动物的演替

2.1.1 优势种类现状的水平格局

在所调查的东湖 5 个站中,优势度排在前 12 位的原生动物的共有 17 种(表 2)。除 0 站和 V 站种类组成差异较大外,其它各站间差异并不大,这表明优势种种类组成的空间异质性已不明显。河流筒壳虫、瓜形膜袋虫和王氏似铃壳虫每站均排在前 4 位,表现出绝对优势。银灰膜袋虫在营养水平高的 0、I、II 3 站表现出较大优势,排名 3 位,而在营养水平较低的 III 站和 V 站排名较后。

图 2 反映了原生动物的优势种随水体富营养化而发生演替的趋势与结果。随着水体的富营养化,优势种的演替主要表现在:V 站和临近的 III 站水体中,有这两站才有的优势种球砂壳虫。II 站的营养水平在 5 个站居中,其优势种既有耐污性种类类钟虫,也有寡污性种类透明麻铃虫。I 站已属严重富营养化水体,武装尾毛虫演替为优势种。0 站的富营养化进一步加重,耐污性的单环栉毛虫和喇叭虫(天蓝喇叭虫和带核喇叭虫,α-中污性至多污性)已演替成为该站特有的优势种属。

表 1 原生动物的采集层次及深度

Table 1 Stratum and depth of sampling protozoa

Station	Depth (m)	Stratum and depth (m)					Sample's volume
		1	2	3	4	5	
0	2.2	0.3	1.0	1.8			1
I	2.9	0.3	1.0	2.0	2.5		1
II	3.9	0.3	1.0	2.0	3.0	3.5	1
III	2.8	0.3	1.0	2.0	2.5		5
V	1.2	0.3	0.8				5

表 2 东湖原生动物优势种丰度所占比例(%,1993-08~1994-08)

Table 2 Proportion of abundance of dominant protozoa in Donghu Lake

优势种类		站位 Stations				
Dominant species		0	I	II	III	V
	年度总量(ind./L)	129918	111055	41184	9995	4801
河流筒壳虫	<i>Tintinnidium fluviatile</i> Stein	20.26	26.30	15.31	6.47	12.18
瓜形膜袋虫	<i>Cyclidium cirtrullus</i> Cohn	16.78	11.06	9.09	6.23	11.73
银灰膜袋虫	<i>Cyclidium glaucoma</i> Müller	14.74	13.05	23.74	2.20	1.83
王氏似铃壳虫	<i>Tintinnopsis wangi</i> Nie	9.29	9.79	15.19	23.93	19.48
毛板壳虫	<i>Coleps hirtus</i> Müller	4.26	2.48	1.67	1.94	6.85
大弹跳虫	<i>Halteria grandinella</i> (Müller)	3.27	2.31	1.42	3.57	10.83
珍珠映毛虫	<i>Cinetochilum margaritaceum</i> Perty	3.16	2.13	3.81	1.77	3.42
单环栉毛虫	<i>Didinium balbianii</i> fabre-domergue	2.81				
点钟虫	<i>Vorticella picta</i> (Ehrenberge)	1.79	2.12	2.84		
喇叭虫属	<i>Stentor</i> spp.	1.63				
沟刺斜管虫	<i>Chilodonella uncinata</i> Ehrenberge	1.77	1.39	1.37		
旋回狭盗虫	<i>Strobilidium gyrans</i> (Stokes)	1.58		2.37	2.97	5.27
似钟虫	<i>Vorticella similis</i> Stokes	1.53			4.25	2.21
绿急游虫	<i>Strombidium viride</i> Stein		2.99	3.92	5.56	4.81
武装尾毛虫	<i>Urotricha armata</i> Kahl		2.69			
透明麻铃虫	<i>Leprotintinnus pellucidus</i> Cleve		1.60	5.53	22.44	
球砂壳虫	<i>Diffflugia Globulosa</i> Dujardin				4.27	1.35

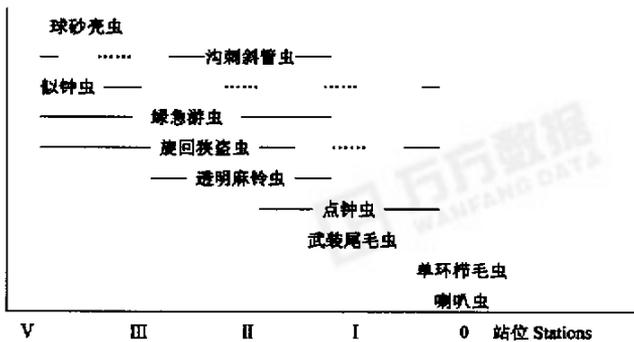


图 2 东湖原生动物优势种的演替(1993-08~1994-08)

Fig. 2 Succession of dominant protozoa in Donghu Lake(1993-08~1994-08)

2.1.2 丰度和生物量的水平空间格局 调查期间,东湖原生动物年均丰度为 59,39ind./L,年均生物量为 1.40mg/L,两者在 5 个站的差异较大,均表现出明显的空间异质性(图 1)。相关性分析表明,富营养化对原生动物现存量具有较大影响,无论是丰度(A)还是生物量(B),都随着水体营养水平(TSI)的增加而极显著增加(表 3)。

表 3 东湖原生动物丰度(A)和生物量(B)与营养水平(TSI)的相关性

Table 3 Correlation between trophic level and abundance and biomass in Donghu Lake

相关公式 Correlation formula	n	R	P
$\ln A = -58.223 + 16.503 \ln TSI$	5	0.983	0.003
$\ln B = -16.840 + 0.256 TSI$	5	0.996	0.000

2.1.3 丰度的周年动态 水体营养水平的增加,不仅增加原生动物丰度,也改变其周年动态模式。尽管不同站位之间丰度的周年动态差异较大(图 3),但 5 个站均出现明显的冬季高峰,富营养化程度较高的 0 站、

I 站和 II 站为最高峰,营养水平较低的 III 站和 V 站为次高峰。其中, II 站的周年动态模式介于 III、V 站与 0、I 站之间,冬季最高峰与 0、I 站趋势一致,而秋季高峰与 III、V 站的趋势较一致。因此,其周年动态模式属演替中的一种过渡类型。5 个站位的周年动态模式既反映了原生动动物现存量随水体富营养化增加的演替过程和趋势,同时严重富营养水体冬季最高峰的出现及秋季高峰的消失,也反映出东湖原生动动物演替的结果。

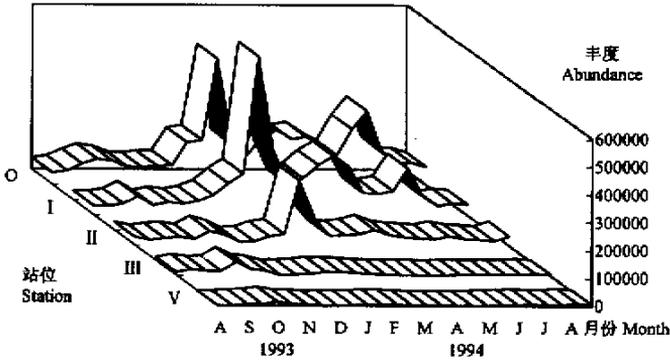


图 3 东湖原生动动物丰度(ind./L)的周年动态(1993-08~1994-08)

Fig. 3 Annual dynamics of the protozoan abundance(ind./L)in Donghu Lake(1993-08~1994-08)

2.2 从年代变化看原生动动物演替 东湖原生动动物现存量和周年动态的空间异质性不仅因同期水体营养水平的空间异质性表现出来,同一站位的原生动动物群落结构也从时间异质性(不同年代)上明显表明了水体营养水平增加所造成的影响。由于原生动动物群落结构复杂,下面仅从优势种和现存量加以分析。

2.2.1 优势种类的演替

不同年代原生动动物优势种的种类组成及丰度在一定程度上表明了其演替趋势。以东湖 II 站为例(表 4),60 年代前 12 位的优势种在 80 年代有 5 种、90 年代有 6 种排名仍在前 12 位,90 年代与 80 年代相同的也是 6 种。河流筒壳虫、瓜形膜袋虫、大弹跳虫和旋回狭盗虫 30 多年来一直排名在前 12 位。

表 4 东湖 II 站原生动动物优势种的演替

Table 4 Succession of dominant protozoa for station II in Dnghu Lake(60s~90s)

排名 Order	60 年代 ^[9]		80 年代 ^[10]		90 年代	
1	大弹跳虫	1064	矮小侠盗虫	1550	银灰膜袋虫	9779
2	似钟虫	816	河流筒壳虫	982	河流筒壳虫	5913
3	一种全毛虫	730	高奇法帽虫	953	王氏似铃壳虫	5596
4	河流筒壳虫	275	大弹跳虫	846	瓜形膜袋虫	3744
5	团脾晚虫	245	活泼尾毛虫	307	透明麻铃虫	2279
6	绿急游虫	194	珍珠映毛虫	245	绿急游虫	1615
7	瓜形膜袋虫	90	瓜形膜袋虫	237	珍珠映毛虫	1569
8	钟形钟虫	55	球形尾毛虫	234	点钟虫	1171
9	旋回侠盗虫	40	似钟虫	196	旋回侠盗虫	975
10	单环栉毛虫	25	旋回侠盗虫	191	毛板壳虫	687
11	双环栉毛虫	11	浮游累枝虫	138	大弹跳虫	583
12	王氏似铃壳虫	9	毛板壳虫	60	沟刺斜管虫	571

从表 4 可见,30 多年来,大弹跳虫一直处于优势但排名逐年代下降;河流筒壳虫、王氏似铃壳虫和瓜形膜袋虫排名逐年代上升;80 年代还未排在前面的银灰膜袋虫和透明麻铃虫 90 年代演替成优势种,前者排名第一;旋回狭盗虫和绿急游虫排名一直靠前,但变化不大;80 年代出现的优势种只有毛板壳虫和珍珠映毛虫 90 年代仍处于优势,而矮小侠盗虫、高奇法帽虫和球形尾毛虫均随演替而退出优势行列。

各年代的优势种除了种类组成的变化外,各种类的丰度随着时间的变化因水体营养水平的增加而大幅度增加。从表 4 可明显看出,从下面对年度总量的分析可进一步看出其演替过程及规律。

2.2.2 丰度的长期变化 从 60 年代到 90 年代,东湖原生动物的丰度随营养水平增加而显著增加(表 5)。以 I 站和 II 站为例,60 年代两站间水体营养水平接近,70 年代以后,随着营养物质的大量输入, I 站的营养水平逐渐高于 II 站,形成

了水体营养状况现有的空间格局^[8]。60 到 90 年代, I 站与 II 站原生动物丰度之比分别为 1.29、1.51、1.80 和 2.70,很明显呈逐渐增加趋势,由此可见, I 站原生动物丰度增加的幅度大于 II 站。这进一步表明了水体营养水平的变化对原生动物演替的影响。同时,对原生动物丰度的增加幅度与同期营养水平的增加幅度^[8]进行比较,两站的结果均表明原生动物丰度增加的速度比营养水平增加的要快。

表 5 东湖 I 站和 II 站原生动物丰度
(ind./L)的年代变化(60s~90s)

Table 5 Long-term changes of protozoan abundance
for station I and II in Donghu Lake(60s~90s)

站位 Stations	60s ^[10]	70s ^[11]	80s ^[1]	90s
I 站	5497	8426	17789	111055
II 站	4270	5594	9873	41184

3 讨论

3.1 富营养化对群落演替的影响

湖泊营养状况与浮游动物生物量呈显著正相关^[4]。东湖原生动物丰度也随营养水平的增加而增加,表现出明显的空间异质性,这一变化趋势与 Müggelsee 湖的结果^[3]非常类似。水体富营养化是影响原生动物时空异质性的重要因子,其可直接影响自养鞭毛虫和混合营养的纤毛虫,其它原生动物则主要受到间接影响,这种影响与营养物质增加导致的食物源增加有关^[12,13]。

营养水平的变化除了影响原生动物丰度的时空分布外,也造成原生动物周年动态的明显演替。原生动物数量的周年变化通常表现为春季和秋季高峰^[14~16]。60 和 80 年代,东湖 I 站和 II 站原生动物丰度也表现如此^[1,10]。70~80 年代, I、II 两站显示出原生动物数量高峰向冬季发展的趋势^[11]。80 年代初,东湖 II 站原生动物秋季高峰已逐渐延长至冬初的 12 月^[1]。到 90 年代,冬季高峰逐渐取代春季和秋季高峰,且表现的越来越明显,在 0、I、II 站已演替为最高峰。其原因可能包括食物链中上行和下行营养两方面的影响。在冬季,大型浮游动物密度较低,一方面,食肉性浮游动物较少减小了对原生动物的捕食,另一方面,食菌性和食藻性浮游动物较少相对增加了原生动物的食物浓度^[17,18],因而,促进了原生动物的生长,其数量和生物量出现冬季高峰。

3.2 演替中的空间概念与时间概念

东湖原生动物的调查结果表明,现有原生动物的空间异质性很好地反映了其年代变化,作为时间序列的演替,在东湖通过空间异质性得到了体现。从营养水平较低的站位到营养水平较高站位的原生动物种类组成及现存量的变化表现了其演替过程。因此,东湖不同站位的现有原生动物群落可看作不同演替阶段的原生动物群落,即可以空间概念代替时间概念。由于客观原因的限制,大多数情况下从时间序列研究群落的演替比较困难,以空间概念代替时间概念研究群落的演替具有重要意义。

3.3 东湖原生动物群落的演替趋势

目前,东湖原生动物群落的演替因富营养化和鱼类的放养而加速并向逆向发展^[19],这两种因子又主要是人为干扰造成的。因此,其今后的演替趋势与人类的各种活动密切相关。如果不控制污染或进行生态修复而任其发展,演替将按照现有方向发展下去。如果人们主动对东湖受污生态系统进行修复,原生动物群落将有可能恢复到正向演替方向。东湖截污将减少营养物质的输入,从而减缓富营养化和原生动物群落的演替速度。如果要从根本上解决问题,恢复生态系统的正常结构与功能,使之再现一个自然的、能自我调节的生态系统,并与所处的生态景观形成一完整的统一体^[20],这是一个十分复杂的综合工程,需要多学科的合作才能完成。另一方面,原生动物群落也很难完全恢复到原有的结构与功能,而只能最大限度地接近受污前的水平^[20,21]。

参考文献

- [1] Nauwerck A. Zooplankton changes in Mondsee. *Verh. Int. Verein. Limnol.*, 1991, **24**:974~979.
- [2] Arndt H Krockner M Nixdorf B, *et al.* Long-term annual and seasonal changes of meta-and protozooplankton in Lake Müggelsee (Berlin) effects of eutrophication, grazing activities, and the impact of predation. *Int. Revue ges. Hydrobiol.*, 1993, **78**:379~402.
- [3] Bays J S and Crisman T L. Zooplankton and trophic state relationships in Florida Lakes. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 1983, **40**:1813~1819.
- [4] 沈韞芬, 陈受忠. 武昌东湖浮游动物数量季节变动的初步观察. *水生生物学集刊*, 1965, **5**(2):133~145.
- [5] 诸葛燕, 黄祥飞. 武汉东湖轮虫种类组成及其分类讨论. *水生生物学报*, 1995, **17**(4):347~356.
- [6] 杨宇峰, 黄祥飞. 武汉东湖浮游动物群落结构的研究. *应用生态学报*, 1994, **5**:319~324.
- [7] 李植生, 等. 东湖水化学现状. 见:刘建康主编. *东湖生态学研究(二)*. 北京:科学出版社, 1995. 36~74.
- [8] 章宗涉, 黄祥飞. *淡水浮游生物研究方法*. 北京:科学出版社, 1991.
- [9] 沈韞芬, 顾曼如. 武昌东湖原生动物生态初步研究. *水生生物学集刊*. 1965, **5**(2):146~181.
- [10] 龚循矩. 从原生动物变化看武汉东湖富营养化的发展. *水生生物学报*. 1986, **10**(4):340~352.
- [11] 黄祥飞, 陈雪梅, 伍焯田, 等. 武汉东湖浮游动物数量和生物量变动的研究. *水生生物学集刊*. 1984, **5**(3):349~362.
- [12] Taylor G T. The role of pelagic heterotrophic protozoa in nutrient cycling; A review. *Ann Inst. Oceanogr. (Paris)* 1982, **58**(s.):227~241.
- [13] Beaver J R and Crisman T L. The role of ciliated protozoa in pelagic freshwater ecosystems. *Microb. Ecol.*, 1989, **17**:111~136.
- [14] Hecky R E and Kling H J. The phytoplankton and proto-zooplankton of the euphotic zone of Lake Tangnyika: Species composition, biomass, chlorophyll content, and spatio-temporal distribution. *Limnol. Oceanogr.*, 1981, **26**:548~564.
- [15] Hunt G W and Chein S M. Seasonal distribution, composition and abundance of the planktonic Ciliata of Cayuga Lake. *Hydrobiologia.*, 1983, **120**:3~9.
- [16] Lewis W M Jr. Protozoan abundance in the plankton of two tropical lakes. *Arch Hydrobiol.*, 1985, **104**:337~343.
- [17] Berninger U-G, *et al.* Protozoan control of bacterial abundance in freshwater. *Limnol Oceanogr.*, 1991, **36**(1):139~147.
- [18] Fenchel T. Suspension feeding in ciliated protozoa: functional response and particle size selection. *Microb. Ecol.*, 1980, **6**:1~11.
- [19] 黄祥飞. 武汉东湖生态系统逆行演替过程及其生态效应. 见:刘建康主编. *东湖生态学研究(二)*. 北京:科学出版社, 1995. 26~35.
- [20] Cairns J Jr. The status of the theoretical and applied science of restoration ecology. *Environ. Prof.*, 1991, **13**:1~9.
- [21] Cairns J Jr. *Restoration of Aquatic Ecosystems*. Washington D C. National Academy Press. 1992, 14~40.