

43-48

原生动物纤毛虫对太湖梅梁湾  
水质富营养化的响应

P 343-3

Q959.117

蔡后建

(中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210002)

**提 要** 1993年4月—1994年1月研究了太湖梅梁湾湖区纤毛虫的群落分布,共检出7目10属。根据TSI指标,该湖区可分为富营养型和中营养型水域,在富营养型水域中分布着特有的纤毛虫种类,纤毛虫的多度和生物量与富营养状态有显著相关性,因此,可作为湖泊富营养化的指示群落。本研究中纤毛虫的主要类群寡毛目和缘毛目的生物量与TSI值存在正相关,随TSI(chl<sub>a</sub>)值的升高而增大。寡毛目一般是贫营养型水域的主要优势群落,富营养型水域内的纤毛虫的个体体积大于中营养型水域的纤毛虫,且有显著差异。

**关键词** 纤毛虫, 营养型, 太湖, 富营养化

**分类号** Q938.8 P343.3

水质

自微型生物环(microbial loop)理论提出以来<sup>[1]</sup>,较多的研究结果表明原生动物纤毛虫在微型生物群落结构的食物链中,是各营养级之间能量流动和物质循环的重要环节。纤毛虫的活动可加速水体内有机磷的物质循环,有助于藻类的生长。纤毛虫对水体内细菌的捕食作用,可提高磷在生态系统中的周转率。

目前,已有许多原生动物纤毛虫的种类可作为环境污染的指示生物<sup>[2]</sup>。太湖梅梁湾湖是太湖接纳无锡、常州市污水的主要水域,由于污染源的排放使梅梁湾形成了不同营养水平的水域,这为研究水体微型生物对污染负荷的响应提供了理想的场所。本研究在不同富营养的水域中监测观察了纤毛虫的群落分布,以分析富营养状况对原生动物纤毛虫群落的影响。

## 1 样品采集与分析

在中国科学院太湖湖泊生态系统研究站对太湖梅梁湾长期定点监测的基础上,选择具有代表性的四个采样点0#(排污口)、1#、2#、8#(湖心)(采样点分布同文献[3])。

在1993年4月至1994年1月之间每月采集一次水样供化学分析,测定TN、TP、叶绿素等,同时采集浮游植物及浮游动物样品。

将1L的水样经醋酸—鲁格氏液固定,静置48h后,移去上清液,将样品浓缩成30mL。在浮游植物计数框内对全框记数,分别记下不同种类纤毛虫的体长和数量,如果个数少于150个/片,则再取样记数。根据不同种类的形体将纤毛虫分别分成四类:锥形、椭球形、球形和圆柱形。根据量得的体长计算其体积,纤毛虫比重取1g/mL,从而可得其生物量。详细方法见文献[4]。

\* 国家自然科学基金资助项目(39600025)。收稿日期:1996-07-31;收到修改稿日期:1996-09-28。

## 2 结果与讨论

对太湖梅梁湾湖区已有的研究表明<sup>[3]</sup>,叶绿素与总氮、总磷有较显著的相关关系,叶绿素已作为评价湖泊富营养化的重要指标,根据 Carlson 的富营养指数 TSI(chla)<sup>[5]</sup>:

$$TSI = 10[6 - (2.04 - 0.68 \ln(\text{chla})/0.693)]$$

分别计算四个不同采样点的 TSI 值,8#、2#、1#、0# 的全年月均 TSI 指数依次增加,这与水体的富营养程度有关,0# 是接受无锡市城市污水的水域,随着水域远离污染源,TSI 值下降,根据 TSI 值与营养程度的划分(表 1),可将 0# (61.6±7.6)、1# (59.6±7.6) 归为富营养型,2# (52.5±7.6)、8# 归为中营养型,其中 8# (47.2±6.4) (湖心)更接近于贫营养型,

表 1 纤毛虫年多度与营养程度的划分<sup>[5,6]</sup>

Tab. 1 Annal abundance of ciliate and trophic state separation

营养状态	超贫营养型	贫营养型	中营养型	富营养型	重富营养型
叶绿素浓度指标(μg/L)	<1	1-5	5-10	10-56	>56
TSI 指数(μg/L)	<30	30-45	45-55	55-70	>72
纤毛虫多度指标(个/mL)	<2.4	2.3-10.8	18.0-70.9	55.5-145.1	90-215.0

\* 括号内值表示纤毛虫年多度值。

### 2.1 不同富营养型水域纤毛虫种类分布的差异

根据对四个采样点纤毛虫的鉴定和记数,共检出 7 目 19 属(表 2)。

富营养型水域(0#、1#)中分布的纤毛虫种类明显多于中营养型水域(2#、8#),从表中可知,各采样点皆有相同的种类生长,如脾腕虫 *Askenasia* spp.、中缢虫 *Mesodinium* spp.、尾毛虫 *Urotricha* spp.、尾丝虫 *Uronema* spp. 及寡毛目(Oligotrichida)的种类,各采样点的水域中皆生长着微囊藻为优势种的种群,因此,附着在微囊藻的钟虫 *Vorticella* spp. 皆可检出。

在富营养型的水体中还分布着特有的纤毛虫种群,如草履虫 *Paramecium* spp.、游仆虫 *Euplotes* spp.、射纤虫 *Actinobolina* spp.、节毛虫 *Didinium* spp.、长颈虫 *Dileptus* spp.、独缩虫 *Carchesium* spp.、后柱虫 *Opisthostyla* spp. 等,这些种群的纤毛虫一般生活在 TSI 值较大,有机质较丰富的水体中,并且其生物量有时可占纤毛虫总生物量的 50% 以上,是纤毛虫群落的优势种类,因此,这些种类可作为水体富营养状况的指标生物。

### 2.2 富营养水平对纤毛虫多度(Abundance)及生物量(Biomass)的影响

不同采样点纤毛虫的月平均多度和生物量可以看出(图 1),其月平均多度及生物量与 TSI 值的变化相吻合,经统计学非配对试验样本均数差异的显著性检验,0# 与 2#、8# 采样点( $P < 0.01$ )及 1# 与 8# 采样点之间( $P < 0.05$ )有显著性差异,因此,纤毛虫群落的多度和生物量与富营养状态具有相关性,大部分纤毛虫主要以滤食细菌和有机碎屑为主,富营养型水域内对纤毛虫的生长和繁殖提供了足够的食物来源,从而促使种群多度和生物量的增加。

表 2 样品中检出的纤毛虫种类  
Tab. 2 Dominant ciliate taxa found in the samples

		0#	1#	2#	8#
前口目 (Prostomatida)	尾毛虫属 ( <i>Urotricha</i> spp.)	+	+	+	-
刺钩目 (Haptorida)	棒胞虫属 ( <i>Askenasia</i> spp.)	+	+	+	-
	栉毛虫属 ( <i>Dadinium</i> spp.)	+	+		
	中缢虫属 ( <i>Medudinium</i> spp.)	+	+	+	-
	射纤虫属 ( <i>Actinobolina</i> spp.)	+	+		
	长颈虫属 ( <i>Dileptus</i> spp.)	-			
膜口目 (Hymenostomatida)	草履虫属 ( <i>Paramecium</i> spp.)	+	+		
盾纤毛目 (Scuticociliatida)	映毛虫属 ( <i>Cinetochilum</i> spp.)				+
	尾丝虫属 ( <i>Uronema</i> spp.)	+	+	+	+
缘毛亚纲 (Peritricha)	钟虫属 ( <i>Vorticella</i> spp.)	+	+	+	+
	猿缩虫属 ( <i>Carchesium</i> spp.)	+			
	原枝虫属 ( <i>Epistylis</i> spp.)	+	+	+	
	后柱虫属 ( <i>Opisthostylis</i> spp.)	+			
寡毛目 (Oligotrichida)	弹跳虫属 ( <i>Halteria</i> spp.)	+	+	+	+
	急游虫属 ( <i>Strombidium</i> spp.)	+	+	+	+
	侠盗虫属 ( <i>Strombidium</i> spp.)	+	-	+	-
	筒壳虫属 ( <i>Tintinnidium</i> spp.)	+	+	+	-
	似铃壳虫属 ( <i>Tintinnopsis</i> spp.)	+	+	+	-
下毛目 (Hypotrichida)	游朴虫属 ( <i>Euplores</i> spp.)	+			

Beaver 和 Crisman<sup>[7]</sup>对佛罗里达州 20 个亚热带湖泊年均 TSI 值和纤毛虫多度及生物量的相关研究也表明两者之间有显著的正相关性, 这与 Pace 对加拿大湖泊的研究<sup>[8]</sup>以及 Mathes 和 Arndt 对德国湖泊的研究结果也是一致的<sup>[9]</sup>, 纤毛虫无疑可以作为湖泊富营养化的指示群落. Beaver 和 Crisman<sup>[6]</sup>还提出了根据 Chla 和纤毛虫的多度来划分富营养型的标准 (表 1). 结果表明: 0# 和 1# 分别为重富营养型和富营养型水域, 2#、8# 为中营养型水域. 这比 TSI 指标对水体营养型的划分更灵敏有效, 并与利用化学指标对水域的分类相一致.

### 2.3 富营养状况对纤毛虫各类群的影响

原生动纤毛虫是一类耐污性较强的生物, 在不同富营养型的水域内都有分布. 分布在梅梁湾湖区的纤毛虫主要类别为寡毛目和缘毛目 (占总多度和生物量的 70%)

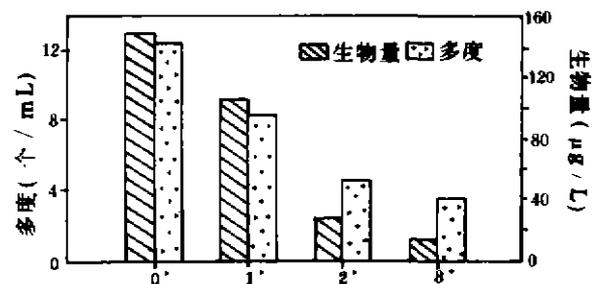


图 1 不同采样点纤毛虫的月平均多度和生物量

Fig. 1 The mean monthly abundance and biomass of ciliate in different sampling stations

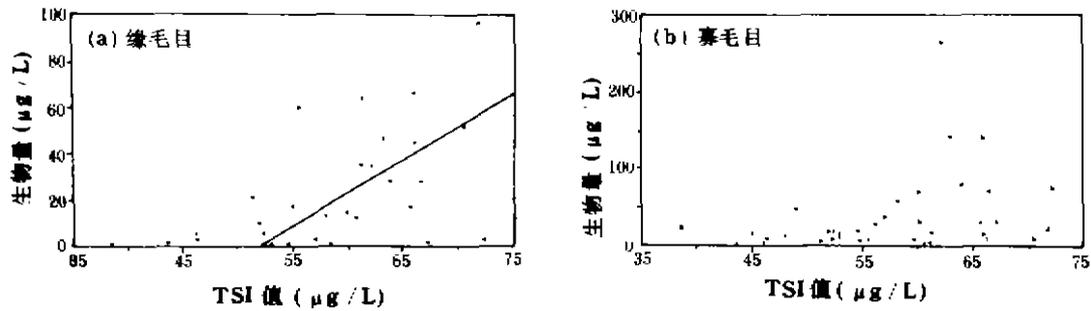


图2 缘毛目(a)、寡毛目(b)生物量与 TSI 值的关系

Fig. 2 The relations between biomass of Peritricbida (a) and of oligotricbida (b) and TSI

以上)。寡毛目和缘毛目的生物量与 TSI 值之间的分布见图 2。

虽然寡毛目的生物量随 TSI 值的增加有所上升,但两者的相关性较差( $P=0.2$ ),有文献报道认为<sup>[2]</sup>,只有小于  $30\mu\text{m}$  的寡毛目种类的生物量随营养状态的增加而上升,而大于  $30\mu\text{m}$  的寡毛目的生物量,则没有相应的关系。缘毛目类群生物量(Biomass)与 TSI 值之间存在着显著的线性相关。

$$\text{Biomass} = -48.9 + 1.22\text{TSI}$$

其中,相关系数为  $0.42(P=0.016 < 0.05)$ 。

表3 不同营养型水域中主要纤毛虫类群的百分率

Tab. 3 Percentage importance of the principal ciliate orders in different states

主要类别	寡毛目	缘毛目	刺钩目	前口目
0# 生物量百分比	41.0±32.1	31.4±27.7	5.72±7.9	0.72±1.7
多度百分比	49.6±37.9	32.0±23.8	5.1±6.5	6.1±10.2
1# 生物量百分比	66.7±26.8	17.6±16.6	2.46±4.5	0.51±1.1
多度百分比	59.4±27.5	26.1±24.0	3.34±5.69	5.2±10.0
2# 生物量百分比	50.4±39.1	38.9±35.8	1.96±4.0	1.14±2.0
多度百分比	42.4±33.2	41.6±32.1	10.82±1.7	7.86±13.2
8# 生物量百分比	60.7±29.2	19.8±21.8	5.0±10.3	0.46±0.9
多度百分比	72.3±19.3	13.2±17.8	3.2±4.7	4.1±7.7

纤毛虫主要类群的生物量和多度在整个群落中所占的百分率也有所不同(表3)。

各采样点的分析结果表明,随着水域远离污染源,寡毛目类群的生物量和多度的百分率呈上升趋势,而缘毛目类群则相反(2# 采样点的缘毛目类群的百分率偏高主要受附生在微囊藻的钟虫生物量的影响)。在中营养型的水域中(如 8# 采样点水域),寡毛目的多度和生物量所占的百分比较高,与其它类群有显著性差异( $P < 0.01$ ),而且寡毛目的多度百分比在富营养型及中营养型水域之间也有显著性差异( $P < 0.05$ )。因此,寡毛目的种类一般是贫营养型水域的主要优势群落<sup>[5]</sup>。在富营养型水域内,缘毛目纤毛虫的生物量和多度百分比有所升高,Stoessel 研究表明缘毛目的多度与  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  和总磷有较好的相关性<sup>[16]</sup>,富营养程度的加重有利于缘毛

目类群的生长,刺钩目和前口目等类别的纤毛虫在整个群落所占比例较小,而且不在每个月份中出现,月均值离散性较大。

#### 2.4 富营养状况对纤毛虫个体体积的影响

从图 3 可见,富营养型水域(0#,1#)的纤毛虫平均个体体积(指纤毛虫各类群体的体积总和除以个体数)大于中营养型水域(2#,8#)。0#,1# 采样点与 8# 采样点的纤毛虫平均体积皆有显著性差异( $P < 0.01$ )。在 2#,8# 采样点的水域内,水体受污染较轻,细菌的浓度较低,经细菌为食的纤毛虫的生长总体上受到了抑制。在这样的水环境中只有以捕食细菌效率较高的小型纤毛虫才容易生存。在富营养型水域内(0#,1# 采样点)纤毛虫的食物来源远超过中营养型的水体,不但细菌的浓度较高,

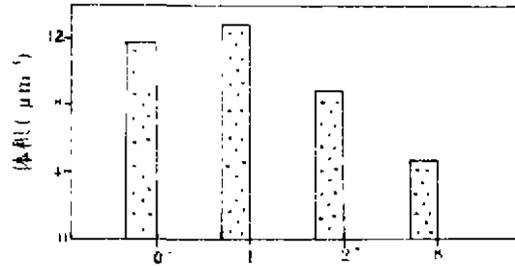


图 3 不同采样点纤毛虫的单位个体平均体积

Fig. 3 The mean individual volume in different sampling stations

同时单细胞藻类也有丰富的生物量,这有利于可摄食藻类的纤毛虫的生长,因而,水体出现了许多耐污的大型纤毛虫如:草履虫、游仆虫、长颈虫等,而且丰富的细菌食物来源也可弥补大型纤毛虫捕食细菌效率较低的缺点(有研究表明大型纤毛虫对小于  $1.0\mu\text{m}$  的细菌颗粒的捕食能力较低)<sup>[11]</sup>,因此,纤毛虫体积在不同富营养化的水域内的变化是适应环境结果。

### 3 小结

(1) 对四个采样点的值的计算,根据 Carlson 富营养指数(TSI 值)的划分,0#,1# 属于富营养型水域,2#,8# 属于中营养型水域。

(2) 纤毛虫在不同营养型水域内的种类分布有较大的差异,结果表明草履虫、游仆虫、射纤虫、节毛虫、长颈虫、独缩虫、后柱虫等只分布在富营养型的水域,这些生物种群可以指示水体的富营养状况,中营养型的水域一般以寡毛目的纤毛虫为优势群落。

(3) 由于富营养型的水域为纤毛虫的生长和繁殖提供了足够的食物来源,因此,纤毛虫的多度和生物量与富营养化有显著的相关性,根据纤毛虫的多度来划分富营养型与 TSI 指标是一致的。

(4) 生长在富营养型水体内的纤毛虫个体体积大于中营养型水体内纤毛虫的个体体积,经统计学检验,有显著性差异,这是纤毛虫对环境条件变化的响应。

### 参 考 文 献

- 1 Azam F, Fenchel T, *et al.* The ecological role of water-column microbes in the sea. *Mar Ecol Prog Ser*, 1983, 10:257-263.
- 2 沈耀芬等. 微型生物监测新技术. 北京: 中国建筑出版社, 1990
- 3 蔡启铭等. 太湖水质的动态变化及影响因子的多元分析. 湖泊科学, 1995, 7(2): 97-105
- 4 章宗沛, 黄祥飞. 淡水浮游生物研究方法. 北京: 科学出版社, 1991

- 5 Carlson R E. A trophic state index for lakes. *Limnol Oceanogr.* 1977, **22**:361—369
- 6 Beaver J R & Crisman T L. The role of ciliated protozoa in pelagic freshwater ecosystem. *Microb Ecol.* 1980, **17**:111—135
- 7 Beaver J R & Crisman T L. The trophic response of ciliated protozoans in freshwater lakes. *Limnol Oceanogr.* 1982, **27**(2): 246—253.
- 8 Pace M C. An empirical analysis of zooplankton community size structure across lake trophic gradients. *Limnol Oceanogr.* 1986, **31**:45—55.
- 9 Mathis J & Arndt H. Biomass and composition of protozooplankton (nano- and microflagellates, Sarcodines, ciliates) in relation to lake trophic in north German lakes. *Mar. Microb. Food Webs*, in press.
- 10 Fenchel T. Suspense feeding in ciliated protozoa: functional response and particle size selection, feeding rates and their ecological significance. *Microb Ecol.* 1980a, b, **1**:1—11, **13**:1—25.
- 11 Stoessel F. On the ecology of ciliates in riverwaters; the evaluation of water quality via ciliates and filamentous bacteria. *Aquatic Science.* 1989, **51**(3):235—248.

## The Response of Ciliated Protozoans to Eutrophication in Meiliang Bay of Taihu Lake

Cai Houjian

(Nanjing Institute of Geography & Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008)

### Abstract

The distribution of ciliated protozoans was studied in Meiliang Bay of Taihu Lake from Apr. 1993 to Jan. 1994. 7 orders and 19 genus were recorded. On the basis of the trophic state index [TSI(chla)], the study area was separated into mesotrophic and eutrophic regions. Some of the genus were restricted to eutrophic situations, such as: *Paramecium* spp., *Euplotes* spp., *Actinobolina* spp., *Didinium* spp., *Dileptus* spp., *Curchesium* spp., *Opisthostyla* spp. The mean monthly abundance and biomass of total ciliates were positively correlated with the trophic gradient. Ciliated protozoan was a good indicative community for the lake eutrophication. The orders (Oligotrichida and Peritrichida) dominated the ciliate assemblages and increased with the rising of the TSI(Chla). Oligotrichida was mainly dominant in the mesotrophic region. The mean volume of the ciliated protozoans in eutrophic lake region was larger than that in the mesotrophic region with significant difference.

**Key Words** Ciliate, trophic state, Taihu lake, eutrophication