

142-147

15079(5)

第15卷 第2期
1995年6月生态学报
ACTA ECOLOGICA SINICAVol. 15, No. 2
Jun., 1995

武汉东湖浮游动物对浮游细菌的 牧食力研究*

李纯厚

中国水产科学研究院南海水产研究所, 广州, 510300

林婉莲

中国科学院水生生物研究所, 武汉, 430072

A

~~0959891~~

摘要 利用 35 μm 、54 μm 、90 μm 和 360 μm 等不同大小孔径的筛绢网过滤湖水进行了浮游动物对浮游细菌牧食力的研究。结果表明, 东湖浮游动物对浮游细菌总滤过率为 180, 19 $\text{ml l}^{-1}\text{h}^{-1}$, 摄食率为 0.40 $\mu\text{gCl}^{-1}\text{h}^{-1}$, 90 μm 以下的个体为原生动物和轮虫, 它们组成了群落总生物量的 75%, 其对细菌的牧食力占总牧食力的 44.8%, 大于 360 μm 的浮游动物(主要是甲壳动物)的牧食力占总牧食力的 35.1%, 大于 90 到小于 360 μm 的浮游动物其牧食力最小, 只占总牧食力的 20%。文中分别用滤过率、摄食率和特定摄食率对各浮游动物组分进行了比较, 甲壳动物的特定摄食率比原生动物和轮虫的特定摄食率之和为大文中并讨论了可能影响浮游动物对浮游细菌牧食力的有关因素。

关键词: 浮游动物, 牧食力, 浮游细菌, 浮游生物

武汉东湖是位于长江中下游的一个中型浅水湖泊, 浮游生物在整个湖泊生态系统结构与功能中有着重要的地位。要弄清浮游生物间的能流动态, 浮游动物的牧食力是个不能忽视的内容。国外有关浮游动物牧食力的研究已有很多报道⁽¹⁻⁶⁾, 国内尚未见有系统研究。本工作着重研究浮游动物对浮游细菌的牧食力。

1 材料与方方法

牧食实验在 1990 年春季进行。取东湖中心站(Ⅱ站)混合水样若干升, 分别用 35 μm 、64 μm 、90 μm 和 360 μm 筛绢网过滤, 滤液及未滤过的水样分别装入已编号的 2L 容量的试剂瓶中, 用塞子把瓶口塞紧, 然后将实验瓶悬挂在湖面下 0.5—0.8m 水深处进行原位(in situ)牧食实验 6h。每一实验设 2 个平行组, 隔天进行 1 次, 连续实验 3 次。

每批实验结束时, 各瓶水样立即用中性福尔马林液固定(最后浓度为 4%), 然后分别从各样品瓶中取均匀水样 15—20mL 置指管中保存以供浮游细菌计数用。另取均匀水样 1L 倒入沉淀器静置沉淀, 得沉淀浓缩样以供镜检和计数浮游动物种类组成及其生物量变化。

浮游细菌采用表面荧光直接计数法(AODC 法)⁽⁷⁾。其数量计算公式为

$$N = \frac{b \cdot e}{a \cdot c \cdot d} \quad (1)$$

式中: a = 水样用量(2mL), b = 滤膜有效面积($12.5664 \times 10^8 \mu\text{m}^2$),

c = 每视野计数面积[(50) $^2 \mu\text{m}^2$], d = 每样品计数视野数(20),

e = 所有视野计数得的细菌总数(cells)。

* 国家自然科学基金项目(3880152)的研究内容之一, 同时得到水生生物研究所国家重点实验室资助, 本研究在中国科学院水生生物研究所(武汉)进行。

收稿日期 1993 07 10, 修改稿收到日期: 1994 05 11。

浮游动物对浮游细菌的滤过率公式(3)参照 Peterson 等^[3]的公式(2)而建立。

$$C = \ln \frac{C_0}{C_1} \cdot \frac{v}{N \cdot t} \quad (\text{单位为: mL ind}^{-1}\text{h}^{-1}) \quad (2)$$

上述公式的应用,原基于下述两点假设:1. 有一定的食物浓度(细菌密度)存在就有一定的浮游动物牧食率;2. 实验期间细菌密度随时间增加作指数下降。若对照组中细菌密度出现指数增加或指数下降,则把对照组在 t 时的细菌密度 C_1 置换 C_0 ^[3],并以含一定数量浮游动物的单位体积水样代替浮游动物个体数而得下式:

$$C = \frac{\ln(C_1 - C_t) \cdot v}{N \cdot t} \quad (\text{单位为 mL l}^{-1}\text{h}^{-1}) \quad (3)$$

式(3)所得数值代表单位体积水样中浮游动物对浮游细菌的总滤过率。

经镜检,在 35 μm 筛绢滤过的水样中未见任何浮游动物,故以此组过滤水样作对照实验。

摄食率、特定摄食率(单位浮游动物湿重的摄食率)计算式分别见(4)和(5)。

$$F = A \cdot C \cdot C_0 \quad (4)$$

$$F_s = F/B \quad (5)$$

式(2)–(5)中:

C = 滤过率($\text{mL l}^{-1}\text{h}^{-1}$), C_t = t 时对照组浮游细菌密度(cells l^{-1}),

C_1 = t 时实验样品中浮游细菌密度(cells l^{-1}),

C_0 = 实验开始时水样中浮游细菌现存量(cells l^{-1}),

v = 实验水样体积(2000mL), N = 以单位水体计的浮游动物量(L),

t = 实验时间(h), F = 摄食率($\mu\text{gC l}^{-1}\text{h}^{-1}$),

A = 转换系数, F_s = 特定摄食率($\mu\text{gC mgwwt}^{-1}\text{h}^{-1}$),

B = 实验瓶中浮游动物生物量(mgwwt l^{-1})。

根据 Ye Jun 等^[12]的研究结果,武汉东湖水柱中的细菌平均细胞体积为 $0.0132\mu\text{m}^3$,计算得平均每个细菌碳含量为 $0.99 \times 10^{-9}\mu\text{g}$ (细菌碳 = 平均细胞体积 \times 细菌数量 $\times 10^{-6} \times 15\% \times 50\%^[12])。此值即为转换系数 A 值。$

2 结果与讨论

2.1 东湖浮游动物种类组成及生物量

实验瓶中浮游动物的种类组成:原生动物的种类组成:原生动物主要有 *Strobilidium gyrans*, *Vorticella campanula*, *Urotricha* sp., *Halteria grandinella* 和 *Askenasia volvox* 等;优势轮虫种类有 *Polyarthra trigla*, *Synchaeta oblonga*;枝角类是 *Daphnia hyalina*;桡足类则以 Cyclopoida 为主。90 μm 以下的个体为原生动物和轮虫,它们组成了群落总生物量的 75%。各组分浮游动物的生物量详见表 1。

2.2 东湖浮游动物对浮游细菌的牧食力

实验前后各实验瓶中的浮游细菌密度变化见表 2。东湖浮游动物对浮游细菌的牧食力见表 3。不同大小组分浮游动物对浮游细菌的牧食力各不相同,平均总滤过率为 $180.19\text{mL l}^{-1}\text{h}^{-1}$,总摄食率为 $0.40\mu\text{gC l}^{-1}\text{h}^{-1}$ 。90 μm 以下的组分对细菌的牧食力占总牧食力的 44.8%,大于 360 μm 的组分牧食力占总牧食力的 35.1%。牧食力最低的是 90–360 μm 范围内的浮游动物,只占总牧食力的 20%。

表 1 1990 年春季武汉东湖浮游动物的大小分布

Table 1 Zooplankton in different size groups, Lake Donghu, Wuhan in spring, 1990

浮游动物 Zooplankton	生物量(%生物量)Biomass(% of biomass) (mgwwt ⁻¹)			
	<64μm	<90μm	<360μm	未过滤水样 non-filtered
原生动物 Protozoa	0.250 (41.41)	1.509 (75.62)	1.421 (58.74)	1.633 (56.98)
轮虫 Rotifera	0.354 (58.59)	0.486 (24.38)	0.569 (23.53)	0.514 (17.93)
枝角类 Cladocera	0 (0)	0 (0)	0.062 (2.56)	0.155 (5.40)
桡足类 Copepoda	0 (0)	0 (0)	0.367 (15.17)	0.564 (19.60)
总生物量 Total biomass	0.604	1.995	2.419	2.866

表 2 实验前后各实验瓶中浮游细菌密度变化

Table 2 The changes of bacterial abundance in different size groups of zooplankton

实验日期 Date of exam.	0 h	细菌密度 Bacterial density (×10 ⁸ cells/ml)				
		对照组	<64μm	<90μm	<360μm	未过滤湖水
Apr. 24	1.8598	4.4484	3.3300	2.5006	2.0357	1.1309
Apr. 26	2.3624	5.0264	3.9332	3.1415	2.5509	1.7844
Apr. 28	2.8776	5.5793	4.5112	3.7572	3.0410	2.4127
平均值 Mean	2.3666	5.0180	3.9248	3.1331	2.5425	1.7760

表 3 东湖浮游动物对浮游细菌的牧食力

Table 3 Grazing rates of zooplankton in different size groups on bacterioplankton in Lake Donghu, Wuhan

实验日期 Date of exam.	牧食率 Grazing rates	浮游动物大小组分 Size groups of 200 planakton (μm)				
		<64	≥64- <90	≥90- <360	≥360	Total
Apr. 24	C. R.	48.26	47.74	34.28	97.97	228.25
	F. R.	8.98	8.88	6.38	18.22	42.46
Apr. 26	C. R.	8.89	8.79	6.32	18.04	42.03
	F. R.	40.88	37.46	34.71	59.56	172.62
Apr. 28	C. R.	9.66	8.85	8.20	14.07	40.78
	F. R.	9.56	8.76	8.12	13.93	40.37
平均值 Mean	C. R.	35.42	30.48	35.25	38.57	139.72
	F. R.	10.19	8.77	10.14	11.10	40.21
平均值 Mean	C. R.	10.09	8.68	10.04	10.99	39.81
	F. R.	41.52	38.56	34.75	65.37	180.19
F. R. / Total (%)	C. R.	9.61	8.83	8.24	14.46	41.15
	F. R.	9.51	8.74	8.16	14.32	40.15
F. R. / Total (%)		23.32	21.53	20.01	35.14	100.0

Note: C. R.: 滤过率 (Clearance rate, ml l⁻¹ h⁻¹);

F. R.: 摄食率 (Feeding rate), 上一行数值 (upper line data) × 10⁷ cells L⁻¹ h⁻¹; 下一行数值 (lower line data) × 10⁻⁷ μg CL⁻¹ h⁻¹

由于小于 90μm 组分的浮游动物只有原生动物和轮虫(表 1)而其对浮游细菌的摄食率达 0.18μgC l⁻¹h⁻¹, 占总摄食率的 44.8%(表 3)。可见东湖浮游细菌是原生动物和轮虫的重要食物源。

根据表 1 和表 3 还可计算出东湖浮游动物对浮游细菌的特定摄食率 F_c (表 4), 大于 360μm 的浮游动物 F_c 值最大, 为 0.31μgC mgwwt⁻¹h⁻¹, 大于 90 到小于 360μm 的浮游动物 F_c

值为 $0.19\mu\text{mC mgwwt}^{-1}\text{h}^{-1}$ 。总 F_s 值为 $0.72\mu\text{mC mgwwt}^{-1}\text{h}^{-1}$ 。原生动物和轮虫的 F_s 值为 $0.22\mu\text{mC mgwwt}^{-1}\text{h}^{-1}$, 占总 F_s 的 30.5%。甲壳动物的 F_s 值为 $0.50\mu\text{mC mgwwt}^{-1}\text{h}^{-1}$, 占总 F_s 的 69.5%。从 F_s 看, 甲壳动物对浮游细菌的特定牧食力显然要大于原生动物和轮虫, 这表明东湖水体中浮游甲壳动物对浮游细菌的牧食力不容忽视, 这可为东湖各类浮游动物碳流动态及整个水生态系统间的能流进一步研究提供有力的证据。

表 4 东湖浮游动物对浮游细菌的特定摄食率

Table 4 Special feeding rates (F_s) of zooplankton in different size groups on bacterioplankton in Lake Donghu, Wuhan

	大小组分 (size groups) μm				Total
	<64	≥64- <90	≥90- <360	>360	
生物量 Biomass (mgwwt/l)	0.604	1.391	0.424	0.467	2.866
摄食率 Feeding rate ($10^{-2}\mu\text{gCl}^{-1}\text{h}^{-1}$)	9.51	8.74	8.16	14.32	40.74
特定摄食率 F_s ($\mu\text{gC/mgwwt/h}$)	0.16	0.06	0.19	0.31	0.72

2.3 讨论

浮游动物对水柱浮游细菌的牧食力, 受其本身的种群组成、种群大小、个体年龄、昼夜回游和是否有鱼类捕食压力等因素制约。

不同的水体具有不同的浮游动物种群, 因而在不同的湖泊中, 浮游动物的牧食力不尽相同(表 5)。若从碳的角度考察浮游动物对浮游细菌的牧食率, 除上述各种因素之外, 还要考虑细菌碳的估算方法。目前使用的估算方法有两种, 一是用同一水体的经过灭菌的滤过水样作营养加强剂对同一水体细菌进行培养,

然后直接测其含碳量, 再结合电脑辅助系统测出培养物的平均细胞体积从而定其平均细胞碳量^[11,12]。另一种方法是利用扫描电镜-电脑辅助系统测出天然水体中细菌的平均细胞体积, 并假设细胞干重等于其湿重的 15%, 碳含量等于其干重的 50%, 然后计算出其平均细胞碳含量^[8,10]。不管使用上述哪一种方法, 细菌碳的含量, 最终取决于细菌体积的大小。培养的细菌, 体积多比天然种群的体积大, 其含碳量便相对地高, 计算出的浮游动物摄食率也自然就大。对于第二种方法, 15% 和 50% 这两个数值是个经验系数, 应用到具体一个湖泊可能有误差。本研究采取第二种方法, 借助扫描电镜-电脑辅助系统直接测定水体中细菌体积, 因此所获得的结果较能客观地反映东湖浮游动物对细菌的牧食力。

Jørgensen 等^[9]的研究表明, 浮游动物对浮游细菌的牧食力具明显的昼夜变化。一般从 08:00-12:00, 牧食力保持稳定, 然后逐渐增大, 至 20:00 出现一个高峰, 随后下降, 至 24:00 降到最低值, 然后回升, 04:00 达最大值, 以后又开始下降, 到 08:00 则又重新稳定在一定水平。稳定期间牧食力稍低于一天中总牧食率的平均值。东湖的实验时间设在 09:00-15:00, 即正是 Jørgensen 等所发现的牧食力比较稳定的时期, 实验结果所得数值能否代表一天中浮游动物牧食力每小时的平均水平, 还有待进一步研究。

Riemann^[16]曾在丹麦 Frederiksborg slotssø 湖利用实验围栏 (experimental enclosures) 研究了鱼类捕食作用在浮游动物对浮游细菌牧食过程中的潜在影响。他发现, 鱼类的捕食极大地影响了浮游动物对浮游细菌的牧食力。在无鱼系统中, 大于 $140\mu\text{m}$ 的浮游动物的摄食率高达 $3\mu\text{gC l}^{-1}\text{h}^{-1}$ 。在有鱼系统和敞水面实验组中仅为 $0.3\mu\text{gC l}^{-1}\text{h}^{-1}$ 。他进一步研究发现, 大于 $50\mu\text{m}$ 的浮游动物在无鱼系统内利用了净次级细菌生产量的 48%-51%, 而在有鱼系统中只有 4%。鱼类的这种作用究竟是直接的还是间接的, 有待作进一步研究。

表 5 几个湖泊浮游动物对浮游细菌的牧食力概况

Table 5 Grazing rates of zooplankton on bacterioplankton in some lakes

类群/种类 Size groups/ Species	滤过率 Clearance rate	摄食率 Feeding rate	参考资料 References
50 - 200 μ m (Rotifera and some Cladoceras)	2.5 (ml/l/h)		Bjornsen <i>et al.</i> , [1], Lake Hylke.
>200 μ m (Crustacea)	9.9 (ml/l/h)		
Total zooplankton	12.3 (ml/l/h)		
>140 μ m		6.8 (μ gC/24 h)	Jorgensen <i>et al.</i> , [13], Lake Almind; Lake Hylke
>50 μ m		10.0 (μ gC/l/24 h)	
<64 μ m	41.5 (ml/l/h)	0.095 (μ gC/l/h)	This paper, Lake Donghu.
\geq 64 - <90 μ m	38.6 (ml/l/h)	0.088 (μ gC/l/h)	
\geq 90 - <360 μ m	34.8 (ml/l/h)	0.082 (μ gC/l/h)	
\geq 360 μ m <	65.3 (ml/l/h)	0.143 (μ gC/l/h)	
Total zooplankton	180.1 (ml/l/h)	0.408 (μ gC/l/h)	
<i>Ceriodaphnia lacustris</i> :	0.13 (ml/ind./h)		Porter <i>et al.</i> , [14]; Pacu <i>et al.</i> , [15], Lake Oglethorpe.
juvenile adult <i>Daphnia parvula</i> :	0.28 (ml/ind./h)		
juvenile adult	0.19 (ml/ind./h)		
<i>Daphnia magna</i>	0.31 (ml/ind./h)		
	0.27 (ml/ind./h)		
<i>Calanus</i> sp.	2.2 (ml/ind./d)	2.9×10^{-3} (μ gC/ind./d)	Forsyth <i>et al.</i> , [3], Lake Okaro.
<i>Ceriodaphnia dubia</i>	8.4 (ml/ind./d)	5.5×10^{-3} (μ gC/ind./d)	
<i>Daphnia</i> sp	1.07 (ml/ind./h)		Peterson <i>et al.</i> , [5], Lake Toolik.

武汉东湖主养滤食性鱼类——鲢 (*Hypophthalmichthys molitrix*) 和鳙 (*Aristichthys nobilis*), 鱼类对浮游生物的滤食强度是极大的。我们认为, 滤食性鱼类的强大滤食压力势必直接影响浮游动物的种群密度, 从而间接影响浮游动物对浮游细菌的特定摄食率。至于非滤食性鱼类的有关作用如何评估, 则难以推测。总之, 武汉东湖养殖鱼类对水细菌的作用, 是一个值得进一步研究的课题。

参 考 文 献

- 1 Bjornsen P. K. *et al.* A field technique for the determination of zooplankton grazing on natural bacterioplankton. *Freshwat. Biol.* 1986, 16: 245-253
- 2 DeMott W R. Feeding selectivities and relative ingestion rates of *Daphnia* and *Bosmina*. *Limnol. Oceanogr.* 1982, 27(3): 518-527
- 3 Forsyth D J. *et al.* Zooplankton grazing on lake bacterioplankton and phytoplankton. *J. Plankton Res.* 1984, 6(5): 803-810
- 4 Gophen M. *et al.* Zooplankton feeding on differentially labelled algae and bacteria. *Nature* 1974, 247: 393-394
- 5 Peterson B J *et al.* *Daphnia* grazing on natural bacteria. *Limnol. Oceanogr.* 1978, 23(5): 1039-1044
- 6 Peters R H. *et al.* Empirical analysis of zooplankton filtering and feeding rates. *Limnol. Oceanogr.* 1984, 29(4): 763-784
- 7 Hobbie J E. *et al.* Use of nuclepore filters for counting bacteria by fluorescence microscopy. *Appl. Environ. Microbiol.* 1977, 33: 1225-1228
- 8 Krambeck C. *et al.* Microcomputer-assisted biomass determination of plankton bacteria on scanning electron micrographs. *Appl. Environ. Microbiol.* 1981, 24(1): 142-149
- 9 Rigler F H. Feeding rates. IBP Handbook, vol 17, Balackwell Scientific Publication, Oxford 1971, 231

- 10 Ye Jun *et al.* Computer-assisted biomass determination of bacterioplankton. Annual Report of State Key Laboratory for Freshwater Ecology and Biotechnology of China. International Academic Publishers, Beijing 1991. 63—66
- 11 Bornsen P K. Bacterioplankton growth yield in continuous seawater cultures. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 1986. **30**:191—196
- 12 Bornsen P K. Automatic determination of bacterioplankton biomass by image analysis. *Appl. Environ. Microbiol.* 1986. **51**:1199—1204
- 13 Jorgensen N O, G. *et al.* Concentrations of free amino acids and their bacterial assimilation rates in vertical profiles of two Danish lakes, relations to diel changes in zooplankton grazing activity. *Arch. Hydrobiol. Beih. Ergebn. Limnol.* 1988. **31**:289—300
- 14 Porter K G *et al.* Morphology flow regimes and filtering rates of *Daphnia* and *Bosmina* fed natural bacteria. *Oecologia*. 1983. **58**:156—163
- 15 Pace M L *et al.* Species- and age-specific differences in bacterial resource utilization by two co-occurring cladocerans. *Ecology*. 1983. **64**(5):1145—1156
- 16 Riemann B. Potential importance of fish predation and zooplankton grazing on natural populations of freshwater bacteria. *Appl. Environ. Microbiol.* 1985. **50**(2):187—193

GRAZING RATE OF ZOOPLANKTON ON BACTERIOPLANKTON IN LAKE DONGHU, WUHAN

Li Chunhou

(South China Sea Fisheries Institute, CAFS, Guangzhou, 510300)

Lin Wanlian

(Institute of Hydrobiology, Academia Sinica, Wuhan, 430072)

Grazing rates of zooplankton in different size groups on bacterioplankton were studied in spring of 1990, in lake Donghu, Wuhan. The results show that bacterioplankton is an important food resource for zooplankton, especially for protozoa and rotifera, which contribute almost 75% of the community. It plays an important role in energy flow of this lake ecosystem. The total clearance rate of the zooplankton community on bacterioplankton was 180.10 ml/l·h, total feeding rate was 0.40 μg C l⁻¹ h⁻¹. Grazing rate of zooplankton less than 90 μm which composed of protozoa and rotifera, accounted for 44.8% of the community total grazing rates, and that of the size larger than 360 μm (mainly crustacea) constituted 35.10% of the total. Zooplankton in the size group of ≥90—<360 μm (also crustacea) had less grazing rate which was only 20.0%. In this paper, grazing rates of different size groups of the zooplankton were compared with clearance rate, feeding rate and special feeding rate, respectively. The absolute grazing rate of the crustacea were higher than that of the protozoa and rotifera when compared with special feeding rate. The factors influencing the grazing rates were discussed.

Key words: zooplankton, bacterioplankton, grazing rate.