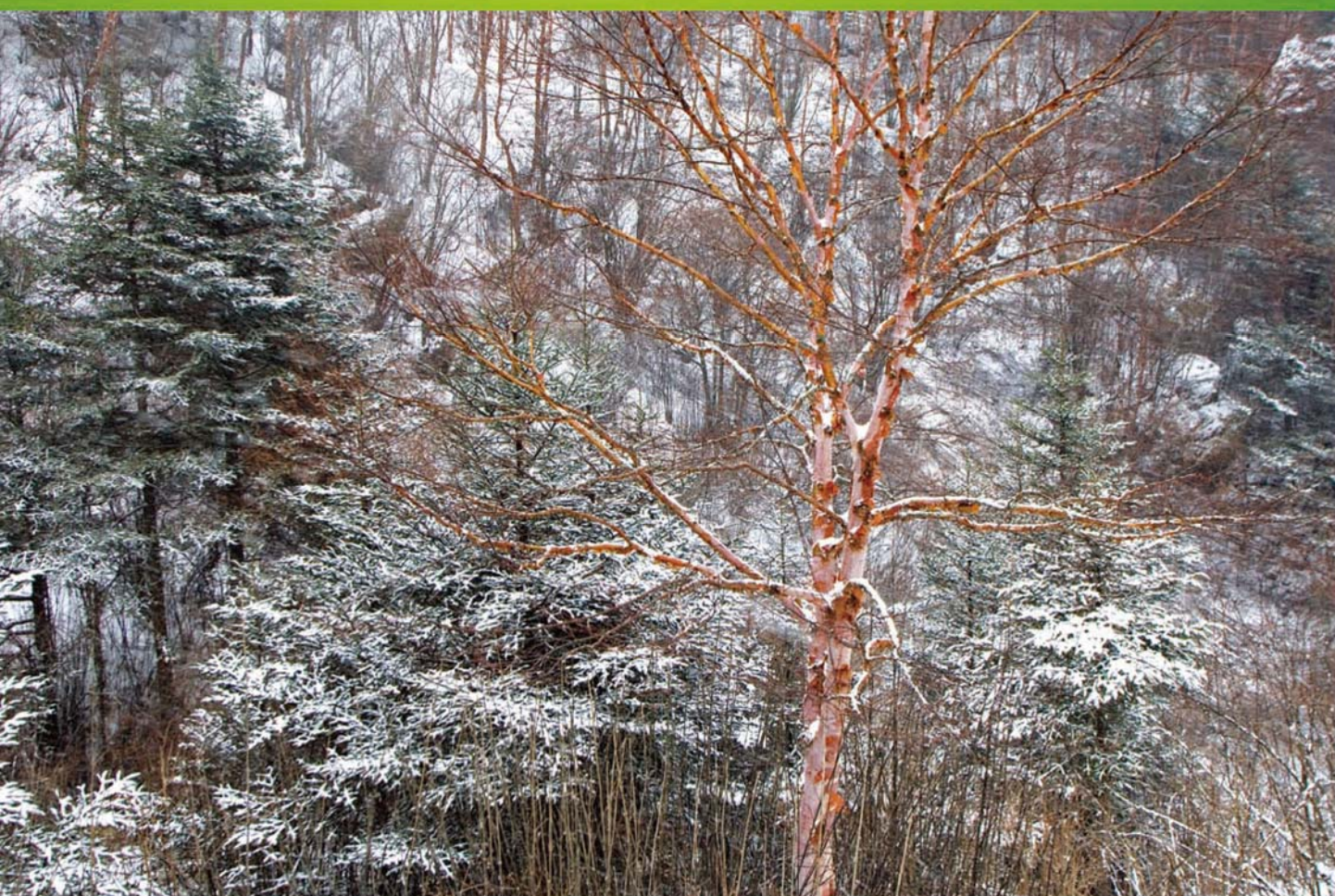


ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

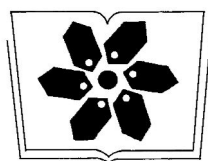
Acta Ecologica Sinica



第34卷 第8期 Vol.34 No.8 **2014**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 34 卷 第 8 期 2014 年 4 月 (半月刊)

目 次

前沿理论与学科综述

- 海洋浮游纤毛虫生长率研究进展..... 张武昌,李海波,丰美萍,等 (1897)
- 城市森林调控空气颗粒物功能研究进展..... 王晓磊,王 成 (1910)
- 雪地生活跳虫研究进展..... 张 兵,倪 珍,常 亮,等 (1922)

个体与基础生态

- 黄河三角洲贝壳堤岛叶底珠叶片光合作用对 CO_2 浓度及土壤水分的响应.....
..... 张淑勇,夏江宝,张光灿,等 (1937)
- 米槠人促更新林与杉木人工林叶片及凋落物溶解性有机物的数量和光谱学特征.....
..... 康根丽,杨玉盛,司友涛,等 (1946)
- 利用不同方法测定红松人工林叶面积指数的季节动态..... 王宝琦,刘志理,戚玉娇,等 (1956)
- 环境变化对兴安落叶松氮磷化学计量特征的影响 平 川,王传宽,全先奎 (1965)
- 黄土塬区不同土地利用方式下深层土壤水分变化特征 程立平,刘文兆,李 志 (1975)
- 土壤水分胁迫对拉瑞尔小枝水分参数的影响..... 张香凝,孙向阳,王保平,等 (1984)
- 遮荫处理对臭柏幼苗光合特性的影响..... 赵 顺,黄秋娴,李玉灵,等 (1994)
- 漓江水陆交错带典型立地根系分布与土壤性质的关系..... 李青山,王冬梅,信忠保,等 (2003)
- 梭梭幼苗的存活与地上地下生长的关系..... 田 媛,塔西甫拉提·特依拜,李 彦,等 (2012)
- 模拟酸雨对西洋杜鹃生理生态特性的影响..... 陶巧静,付 涛,项锡娜,等 (2020)
- 岩溶洞穴微生物沉积碳酸钙——以贵州石将军洞为例..... 蒋建建,刘子琦,贺秋芳,等 (2028)
- 桂东北稻区第七代褐飞虱迁飞规律及虫源分析..... 齐会会,张云慧,蒋春先,等 (2039)

种群、群落和生态系统

- 鄱阳湖区灰鹤越冬种群数量与分布动态及其影响因素..... 单继红,马建章,李言阔,等 (2050)
- 雪被斑块对川西亚高山两个森林群落冬季土壤氮转化的影响..... 殷 睿,徐振锋,吴福忠,等 (2061)
- 小秦岭森林群落数量分类、排序及多样性垂直格局 陈 云,王海亮,韩军旺,等 (2068)
- 2012 年夏季挪威海和格陵兰海浮游植物群落结构的色素表征 王肖颖,张 芳,李娟英,等 (2076)
- 云南花椒园中昆虫群落特征的海拔间差异分析..... 高 鑫,张立敏,张晓明,等 (2085)
- 人工湿地处理造纸废水后细菌群落结构变化..... 郭建国,赵龙浩,徐 丹,等 (2095)
- 极端干旱区尾间湖生态需水估算——以东居延海为例 张 华,张 兰,赵传燕 (2102)

景观、区域和全球生态

- 秦岭重点保护植物丰富度空间格局与热点地区…………… 张殷波,郭柳琳,王 伟,等 (2109)
- 太阳辐射对黄河小浪底人工混交林净生态系统碳交换的影响…………… 刘 佳,同小娟,张劲松,等 (2118)
- 黄土丘陵区油松人工林生态系统碳密度及其分配 …………… 杨玉姣,陈云明,曹 扬 (2128)
- 湘潭锰矿废弃地不同林龄栎树人工林碳储量变化趋势…………… 田大伦,李雄华,罗赵慧,等 (2137)

资源与产业生态

- 湘南某矿区蔬菜中 Pb、Cd 污染状况及健康风险评估 …………… 吴燕明,吕高明,周 航,等 (2146)

城乡与社会生态

- 北京市主要建筑保温材料生命周期与环境经济效益评价 …………… 朱连滨,孔祥荣,吴 宪 (2155)
- 城市地表硬化对银杏生境及生理生态特征的影响…………… 宋英石,李 锋,王效科,等 (2164)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 276 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 29 * 2014-04



封面图说: 冷杉红桦混交林雪——冷杉是松科的一属,中国是冷杉属植物最多的国家,约 22 种 3 个变种。冷杉常常在高纬度地区至低纬度的亚高山至高山地带的阴坡、半阴坡及谷地形成纯林,或与性喜冷湿的云杉、落叶松、铁杉和某些松树及阔叶树组成针叶混交林或针阔混交林。冷杉具有较强的耐阴性,适应温凉和寒冷的气候,土壤以山地棕壤、暗棕壤为主。川西、滇北山区的冷杉林往往呈混交状态,冷杉红桦混交林为其中重要的类型。雪被对冷杉林型冬季土壤氮转化影响的研究对揭示高山森林对气候变化的响应及其适应机制提供重要的理论支持。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201304270836

张武昌, 李海波, 丰美萍, 陈雪, 于莹, 赵苑, 肖天. 海洋浮游纤毛虫生长率研究进展. 生态学报, 2014, 34(8): 1897-1909.

Zhang W C, Li H B, Feng M P, Chen X, Yu Y, Zhao Y, Xiao T. Growth rates of marine planktonic ciliates: a review. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(8): 1897-1909.

海洋浮游纤毛虫生长率研究进展

张武昌^{1,*}, 李海波^{1,2}, 丰美萍^{1,2}, 陈雪^{1,2}, 于莹^{1,2}, 赵苑¹, 肖天¹

(1. 中国科学院海洋研究所, 海洋生态与环境科学重点实验室, 青岛 266071; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 浮游纤毛虫是海洋环境中连接微食物网与经典食物链的重要中介, 在浮游生态系统的物质循环和能量流动中发挥着重要的作用。从 20 世纪 70 年代末开始, 国际上已在实验室内和海上现场开展了对浮游纤毛虫生长率的研究; 国内在这方面起步比较晚, 只有在实验室内对浮游纤毛虫生长率进行过少量研究, 海上现场生长率的研究迄今尚无。对相关浮游纤毛虫生长率的研究成果进行了综述, 以期为我国的相关研究提供借鉴。室内培养的研究结果表明, 浮游纤毛虫的生长率与温度和饵料有关, 在特定的温度下, 饵料浓度低于生长阈值浓度时, 纤毛虫停止生长, 随饵料浓度的上升, 生长率增加, 饵料浓度增加到一定程度, 生长率达到内禀生长率, 此后, 随饵料浓度增加不再增加。目前在实验室内测定了 34 种海洋浮游纤毛虫的内禀生长率, 范围为 0.1—3.05 d⁻¹。在特定的饵料种类下, 纤毛虫的内禀生长率与温度有关, 温度过低停止生长甚至死亡, 在此基础上, 随温度升高, 内禀生长率呈线性增加, 温度增加到一定程度, 内禀生长率降低。pH 值升高对纤毛虫的生长有不利影响。估计自然海区纤毛虫生长率的方法主要是海水分粒级培养法, 得出的生长率最大为 3.3 d⁻¹。自然海区的纤毛虫生长率受温度影响较大, 缺氧区纤毛虫生长率的变化因纤毛虫类群而不同, 纤毛虫生长是否受饵料影响(上行控制)在不同的海区有不同的结果。根据纤毛虫生物量和生长率可以估计纤毛虫生产力, 大多数纤毛虫生产力的估计高于桡足类生产力。

关键词: 浮游纤毛虫; 生长率; 现场培养; 分粒级培养

Growth rates of marine planktonic ciliates: a review

ZHANG Wuchang^{1,*}, LI Haibo^{1,2}, FENG Meiping^{1,2}, CHEN Xue^{1,2}, YU Ying^{1,2}, ZHAO Yuan¹, XIAO Tian¹

1 Key Laboratory of Marine Ecology and Environmental Sciences, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Marine planktonic ciliates are a link between microbial food web and classical food chain. They play a pivotal role in material cycling and energy flow in marine ecosystem. Since the 1970s, growth rates of marine planktonic ciliates have been studied in both laboratory and *in situ*. Only few laboratory studies on ciliate growth rates are available in China, and no field research has been carried out to determine the growth rates of planktonic ciliates. This review summarizes previous studies on the growth rates in both laboratory and *in situ*. Laboratory experiments show that the growth rates varied with food type and temperature. Under a certain temperature, ciliate would stop growing or die when food availability is below its threshold value. The growth rates could increase as food concentration increase over the threshold value, and then reach intrinsic growth rate ($\mu_{\max}$), stay or drop slightly at a high food concentrations. Scientists estimated the $\mu_{\max}$ values of 34 oligotrichous ciliate species in laboratory; and the values ranged 0.1—3.05 d⁻¹. Feeding on a given prey, ciliate would stop growing or die at low temperature. $\mu_{\max}$ increased linearly with temperature in the intermediate range. Higher pH will restrain $\mu_{\max}$. Size-fractionated seawater incubation was used to estimate *in situ* ciliate growth rate, from which the maximum growth rate was 3.3 d⁻¹. Temperature, hypoxia, and prey (bottom up control) influenced the ciliate growth rate in different

基金项目: 国家重点基础研究计划(973 计划)项目(2011CB409804, 2014CB441504); 中国科学院战略性先导科技专项(XDA11030202.2)

收稿日期: 2013-04-27; **修订日期:** 2013-12-31

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wuchangzhang@163.com

regions. Planktonic ciliate production, calculated according to ciliate abundance and growth rate, was higher than planktonic copepod production in most cases.

Key Words: planktonic ciliate; growth rate; *in situ* incubation; size-fractionated incubation

海洋浮游纤毛虫是一类具纤毛并营浮游生活的单细胞原生动物,属于纤毛门(Ciliophora),多数属于旋毛纲(Spirotrichea)下的寡毛亚纲(Oligotrichia)及环毛亚纲(Choreotrichia)。浮游纤毛虫的粒级在10—200 μm 之间,根据壳的有无分为具壳的砂壳类(900余种)和无壳类(约150种),它们在自然水体中的丰度约为1000个/L,在大多数情况下,无壳纤毛虫的丰度较高。

浮游纤毛虫与异养腰鞭毛虫(dinoflagellates)和鞭毛虫(flagellates)同属于海洋浮游生态系统粒级划分的微型浮游动物(microzooplankton),是海洋浮游食物网的重要组成部分^[1],它们摄食pico和nano级浮游生物,同时被中型浮游动物(mesozooplankton)摄食,所以浮游纤毛虫是联系微食物网和经典食物链的重要环节。同浮游植物相比,纤毛虫具有较高的营养价值,颗粒粒径较大,在桡足类饵料中占的比例较大。

浮游纤毛虫生长率是估计纤毛虫生产力的重要参数。同浮游植物初级生产和中型浮游动物次级生产是浮游生态学研究的重要内容一样,浮游纤毛虫的次级生产也是海洋浮游生态学研究的重要内容。浮游纤毛虫生长率是理解其种群动力学的重要参数。浮游纤毛虫的丰度和生物量是纤毛虫生长和死亡共同作用的结果,无法反映出种群动态变化的机制。生长率是评价纤毛虫种群受上行控制(饵料不足)和下行控制(摄食压力过大)影响的重要参考指标。

目前国外在实验室内(自Heinbokel^[2]开始)和海上现场(自Capriulo^[3]开始)都对浮游纤毛虫的生长率进行了研究,国内在这方面研究还比较少,实验室内对浮游纤毛虫生长率的研究只有类彦立等^[4],海上现场生长率的研究还未涉及。目前已经在我国海区积累了一些浮游纤毛虫丰度和生物量的资料,纤毛虫现场生长率的研究是我国微型浮游动物生态学亟需进行的内容之一,本文综述了海洋浮游纤毛虫生长率和生产力的研究历史和现状,为我国浮游

纤毛虫生长的研究提供借鉴。

1 室内浮游纤毛虫生长率的研究方法

测定纤毛虫生长率的方法,都是将一定丰度的纤毛虫放入含有饵料(不同种类、种类组合或自然饵料)的培养液中培养一段时间 t (d),估计培养前(C_0)和培养后(C_t)培养液中纤毛虫的丰度,假设纤毛虫的生长为指数生长,生长率(μ , d^{-1} 或 h^{-1})按照公式 $\mu = \ln(C_t/C_0)/t$ 计算得出。

上述纤毛虫的生长率是根据纤毛虫丰度变化来计算,这样做的前提是假设所有纤毛虫的体积是一样的。但是纤毛虫的体积在不同的营养状况下会有变动。Montagnes和Lessard^[5]报道*Strombidinopsis multitaureis*在饵料充足时的体积是饥饿时体积的2倍。而Fenchel和Jonsson^[6]报道*Strombidium sulcatum*的体积变化可达8倍。Ohman和Snyder^[7]报道*Strombidium* sp.在指数生长期的细胞体积小一些,在稳定期细胞体积增大,变化达2倍。兼性自养的种*Laboea strobila*和*Strombidium conicum*在不同的光照下体积变化可达2倍^[8-9]。温度也可能影响细胞的体积,例如Montagnes和Lessard^[5]报道*Strombidinopsis multitaureis*体积在10℃最大,在5—10℃细胞体积随温度升高而变大,在10—22℃细胞体积随温度升高而变小。因此纤毛虫生长率的这个计算方法也有不足之处。

2 室内浮游纤毛虫生长率研究的结果

2.1 饵料浓度对纤毛虫生长率的影响

对于特定的纤毛虫种类,在一定的温度下,其生长率与饵料浓度的关系叫数值反应。Heinbokel^[2]首先研究浮游寡毛类纤毛虫的数值反应,发现纤毛虫的生长率随饵料浓度的变化成双曲线型,在饵料浓度低时不生长,生长率随饵料浓度增加而增大,当饵料浓度达到和超过一定的数值时,随着饵料浓度的增加,生长率稳定在一定的水平或者有所下降,这时的生长率为内禀生长率(μ_{max})(图1)。

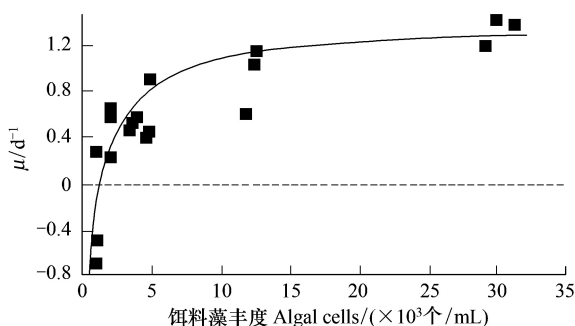


图1 纤毛虫 *Strobilidium spiralis* 生长率 (μ) 随饵料藻丰度的变化^[10]

Fig. 1 The relationship between growth rate (μ) of *Strobilidium spiralis* and algal cells^[10]

Montagnes^[11] 把特定温度下纤毛虫的生长率与饵料浓度的关系表示为:

$$\mu = \mu_{\max} \times [(P-x') / (k + (P-x'))]$$

式中, P 是饵料的浓度, x' 是生长阈值浓度, 即生长率为零(不生长)时的饵料浓度, k 是常数。当饵料浓度为 $x'+k$ 时, 纤毛虫的生长率为 $\mu_{\max}/2$ 。

不同纤毛虫的生长阈值浓度不同, 从最低 6 $\mu\text{g C/L}$ 到 327 $\mu\text{g C/L}$ (表 1)。浮游纤毛虫在饵料浓度低于生长阈值浓度时会死亡, 但是死亡的时间各不相同。Fenchel 和 Jonsson^[6] 发现 *Strombidium sulcatum* 饥饿 3.5 d 后有 90% 的个体死亡, Montagnes^[11] 发现 *Strobilidium* 和 *Strombidium* 属的种类饥饿 1—2 d 内就会死亡。

除 *Strombidium siculum* 外, *Strombidium* 属的内禀生长率范围较窄 (0.8—1.1 d^{-1})。除了 *S. capitatum*,

表 1 实验室内培养得出的无壳纤毛虫的内禀生长率 ($\mu_{\max}$)

Table 1 Intrinsic growth rates of aloricate ciliates in laboratory ($\mu_{\max}$)

拉丁名 Latin name	中文名 Chinese name	体积/ μm^3 Volume	温度/ $^{\circ}\text{C}$ Temperature	x'	k	$x' + k$	$\mu_{\max}/\text{d}^{-1}$	参考文献 References
<i>Euplotes</i> sp.	游仆虫属		0				0.045—0.12	[17]
<i>Laboea strobila</i>	球果螺体虫	78000	15				1	[8]
<i>Laboea strobila</i>	球果螺体虫	91000	15				0.5	[9]
<i>Lohmanniella oviformis</i>	卵形罗曼虫	3799	11	34	68	102	0.50	[10]
<i>Parauronema</i> sp.	副尾虫		0				0.11—0.26	[17]
<i>Rimostrombidium caudatum</i>	尾裂隙虫		15				0.6	[18]
<i>Rimostrombidium veniliae</i>	尖裂隙虫		15				1.1	[18]
<i>Strombidinopsis cheshiri</i>	切斯里拟盗虫	92000		6	24	34	0.985	[19]
<i>Strombidinopsis multiauris</i>	多耳拟盗虫	186000	5—15	63	114	177	0.1—0.9	[5]
<i>Strombidinopsis</i> sp.	拟盗虫属		20				0.95	[20]
<i>Strombidinopsis</i> sp.	拟盗虫属	560000	19	26	111	137	1.38	[21]
<i>Strombidinopsis acuminatum</i>	尖底拟盗虫		13				0.77	[22]
<i>Strombidinopsis cheshiri</i>	切斯里拟盗虫	45815 92000	16				0.99	[19]
<i>Strobilidium lacustris</i>	湖泊侠盗虫	113000	5.5—21.5	61	160	220	0.43—1.42	[23]
<i>Strobilidium neptuni</i>	尼普顿侠盗虫	110000	16	327	610	938	1.50	[11]
<i>Strobilidium spiralis</i>	螺旋侠盗虫	150000	12	5	37	42	1.06	[12]
<i>Strobilidium spiralis</i>	螺旋侠盗虫	11494	20				1.44	[13]
<i>Strobilidium spiralis</i>	螺旋侠盗虫	68453	14	20	41	61	1.38	[10]
<i>Strobilidium veniliae</i>	维妮莉亚侠盗虫	19635	16	75	224	298	0.72	[11]
<i>Strobilidium</i> sp.	侠盗虫属		24				3.5	[24]
<i>Strombidium acutum</i>	尖锐急游虫	28686	11	23	25	48	0.55	[10]
<i>Strombidium capitatum</i>	具头急游虫	64140	16	271	242	513	0.83	[11]
<i>Strombidium capitatum</i>	具头急游虫	54199	15				1.09	[25]
<i>Strombidium conicum</i>	锥形急游虫	38299	11	6	11	18	0.63	[10]
<i>Strombidium capitatum</i>	具头急游虫	92800	25				1.13	[26]
<i>Strombidium capitatum</i>	具头急游虫	25550	15				0.88	[9]
<i>Strombidium reticulatum</i>	网状急游虫	40000	12	6	43	50	0.86	[12]

续表

拉丁名 Latin name	中文名 Chinese name	体积/ μm^3 Volume	温度/ $^{\circ}\text{C}$ Temperature	x'	k	$x' + k$	$\mu_{\text{max}}/\text{d}^{-1}$	参考文献 References
<i>Strombidium siculum</i>	西里急游虫	28575	16	16	35	51	0.61	[11]
<i>Strombidium</i> sp.	急游虫属	24017	15—20				0.33—3.05	[7]
<i>Strombidium</i> sp.	急游虫属	28420		24	90	114	1.02	[10]
<i>Strombidium</i> sp	急游虫属		0				0.03—0.21	[17]
<i>Strombidium sulcatum</i>	具沟急游虫	33500	15				1.75	[27]
<i>Strombidium sulcatum</i>	具沟急游虫	10000	20				2.88	[6]
<i>Strombidium sulcatum</i>	具沟急游虫	19000	18				2.16	[28]
<i>Strombidium sulcatum</i>	具沟急游虫		20—30				0.93—2.30	[29]
<i>Strombidium sulcatum</i>	具沟急游虫		18—30				2.5—8.3	[4]
<i>Strombidium vestitum</i>	浅裂急游虫	8205	14	7	29	36	1.04	[10]

x' 是生长率为零(不生长)时的饵料浓度($\mu\text{g C/L}$), k 是常数;当饵料浓度为 $x' + k$ 时,纤毛虫的生长率为 $\mu_{\text{max}}/2$

大多数种类生长率达到 $\mu_{\text{max}}/2$ 的饵料浓度低于 50 $\mu\text{g C/L}$ 。*Strobilidium* 属的种类生长率高一点,但是也更分散,为 0.7—1.7 d^{-1} ,除了 *Strobilidium spiralis* 外,大多数种类生长率达到 $\mu_{\text{max}}/2$ 的饵料浓度高于 100 $\mu\text{g C/L}$ 。*Strobilidium spiralis* 的饵料浓度阈值较低,为 42—61 $\mu\text{g C/L}$ ^[10, 12-13]。*Strombidinopsis* 属的数据不多,既有高的阈值,也有低的阈值,达到 $\mu_{\text{max}}/2$ 的饵料浓度为 34—177 $\mu\text{g C/L}$ 。个体较小的混合营养种 *Strombidium vestitum* 内禀生长率最高^[10]。

2.2 饵料种类对内禀生长率的影响

在相同的温度下,对于不同的饵料,纤毛虫的内禀生长率也不相同。因此内禀生长率常被用来指示饵料的营养价值、适口性^[14-16]。

2.3 温度对内禀生长率的影响

对于同一种类而言,纤毛虫的内禀生长率与温度有关。在饵料适合时,不同温度下纤毛虫的内禀生长率随温度升高而升高,但是温度过高或过低对纤毛虫也有抑制作用(图 2)^[20]。例如 *Strombidinopsis multiauris* 在 5 $^{\circ}\text{C}$ 会死亡,8.5—15 $^{\circ}\text{C}$ 时内禀生长率会从 0.14—0.77 d^{-1} 线性增长,15—19 $^{\circ}\text{C}$ 时内禀生长率(约 0.85 d^{-1})不再增加,22 $^{\circ}\text{C}$ 时内禀生长率会降低(0.13 d^{-1})^[5]。*Strombidium sulcatum* 在 18 $^{\circ}\text{C}$ 时几乎不生长,在 25 $^{\circ}\text{C}$ 时代时间为 5.7 h,30 $^{\circ}\text{C}$ 时代时间为 2 h^[4]。

在实验室内测定过生长率的砂壳纤毛虫有 12 种(表 2),温度范围为 8—25 $^{\circ}\text{C}$,各种的内禀生长率变化范围为 0.45—2.7 d^{-1} 。在实验室内测定过生长率的无壳纤毛虫有 22 种(表 1),温度范围为 5.5—30

$^{\circ}\text{C}$,除具沟急游虫的内禀生长率可达 8.3 d^{-1} 外,其它各种的内禀生长率变化范围为 0.1—3.5 d^{-1} 。

在内禀生长率随温度升高而升高的温度范围内,生长率随温度变化的关系可以用 Q_{10} 来表示:

$$\ln Q_{10} = 10 / (T_2 - T_1) \ln (\mu_2 / \mu_1) \text{ 或}$$
$$Q_{10} = (\mu_2 / \mu_1) \exp (10 / (T_2 - T_1))$$

式中, μ_2 和 μ_1 是温度 T_2 和 T_1 时的内禀生长率。

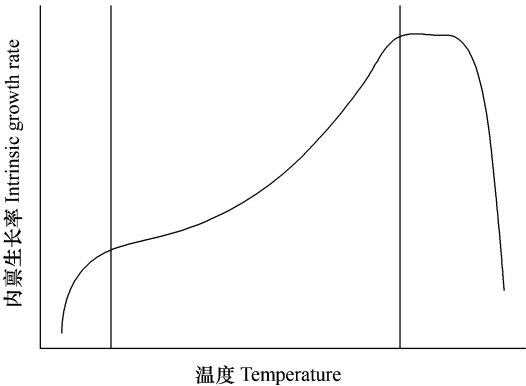


图 2 纤毛虫内禀生长率与温度的关系图^[30]

Fig. 2 Generalized description of the relationship between ciliates intrinsic growth rate and temperature^[30]

Montagnes 等^[30]分析了原生生物的内禀生长率和温度的关系,认为线性关系比 Q_{10} 关系要好,平均的斜率为 0.07。目前根据 5 种寡毛类纤毛虫的内禀生长率随温度升高而变化的资料计算出内禀生长率随温度变化的斜率为 0.052—0.077 (表 3)。Gismervik^[10]利用 0.07 $\text{d}^{-1}^{\circ}\text{C}^{-1}$ 的系数对寡毛类几个种的生长率进行转换成 15 $^{\circ}\text{C}$ 的内禀生长率进行比较。

表 2 实验室得出的砂壳纤毛虫的内禀生长率($\mu_{\max}$)

拉丁名 Latin name	中文名 Chinese name	温度/℃ Temperature	$\mu_{\max}/$ d^{-1}	参考文献 References
<i>Eutintinnus pectinis</i>	栉真铃虫	18	1.44	[2]
<i>Favella azorica</i>	亚速岛网纹虫	20	2.40	[31]
<i>Favella ehrenbergii</i>	爱氏网纹虫	15	0.72	[32]
<i>Favella ehrenbergii</i>	爱氏网纹虫	15	0.5	[18]
<i>Favella ehrenbergii</i>	爱氏网纹虫	18	0.64	[33]
<i>Favella ehrenbergii</i>	爱氏网纹虫	20	0.75	[14]
<i>Favella ehrenbergii</i>	爱氏网纹虫	20	0.51	[34]
<i>Favella</i> sp.	网纹虫属	20	1.38	[15]
<i>Favella</i> sp.	网纹虫属	7	0.38	[35]
		15	0.98	
		20	1.39	
<i>Favella</i> sp.	网纹虫属	8	0.21	[36]
		11.4	0.59	
		16.4	0.87	
		18.8	0.93	
		21.1	0.97	
<i>Favella</i> sp.	网纹虫属	13	0.86	[22]
<i>Favella taraikaensis</i>	塔拉卡网纹虫	20	2.60	[31]
<i>Helicostomella subulata</i>	钻形旋口虫	18	0.84	[2]
<i>Metacylis angulata</i>	菱角类杯虫	20	0.45	[34]
<i>Tintinnopsis acuminata</i>	尖底拟铃虫	18—20	1.57	[37]
<i>Tintinnopsis acuminata</i>	尖底拟铃虫	15	1.2	[38]
		20	1.44	
		25	1.92	
<i>Tintinnopsis acuminata</i>	尖底拟铃虫	18	1.44	[2]
<i>Tintinnopsis beroidea</i>	百乐拟铃虫		0.69	[39-40]
<i>Tintinnopsis dadayi</i>	达氏拟铃虫	20	1.44	[13]
<i>Tintinnopsis tubulosoides</i>	筒状拟铃虫	10	0.87	[15]
<i>Tintinnopsis vasculum</i>	小管拟铃虫	5	0.48	[38]
		10	0.96	
		15	0.96	
<i>Tintinnopsis vasculum</i>	小管拟铃虫	18—20	1.38	[37]

2.4 pH 对纤毛虫生长的影响

Pedersen 和 Hansen^[18]使用室内实验检查 pH 值升高对几种纤毛虫 (*Favella ehrenbergii*, *Rimostrombidium*

caudatum, *R. veniliae*) 生长的影响, 当 pH 值升高到 8.8—8.9 时, 生长率开始降低, pH 值上升到 8.9—9.0 时, 纤毛虫停止生长, 当 pH 值上升到 9.2—9.3 时, 纤毛虫快速死亡。

2.5 不同种类内禀生长率的差异

对于不同种类的无壳纤毛虫, 其内禀生长率与个体大小有关, 一般情况下, 体长大的种类其内禀生长率较低。

但是也有报道体型较大的种类内禀生长率可能相当于或超过体型小的种类^[10-11, 42]。Montagnes^[11]在实验室内测定几种寡毛类纤毛虫的内禀生长率, 个体最大的种类 (*Strobilidium neptuni*) 内禀生长率最高。实验室内测定几种寡毛类纤毛虫的内禀生长率数据表明, 个体最大的异养纤毛虫 *Strobilidium spiralis* 的内禀生长率较高^[10, 12, 43]。

Hansen 等^[44]总结体长范围为 2—2000 μm 的浮游原生动物和浮游后生动物的生长率, 发现随体长增加, 生长率下降。但是对于浮游无壳纤毛虫这一类群而言, 这个规律并不成立。

内禀生长率与体长和温度的关系可以用函数来表达。利用文献中实验室培养的结果, Montagnes 等^[45]得出纤毛虫内禀生长率($\mu_{\max}$)与温度(T)和个体体积大小(V)的关系为:

$$\ln(\mu_{\max}) = 0.1438 T - 0.3285 \ln(V) - 1.3815$$

Müller 和 Geller^[23]则根据不同类群的资料总结了如下公式:

$$\ln(\mu_{\max}) = 1.52 \ln(T) - 0.27 \ln(V) - 1.44$$

Perez 等^[46]根据 Nielsen 和 Kiorboe^[47]的公式 $\ln(\mu_{\max}) = a \ln(T) + b \ln(V) + c$ 进一步给出了混合营养和异养纤毛虫内禀生长率与温度及体长间的不同系数。

表 3 浮游寡毛类纤毛虫生长率和温度的关系

Table 3 The relationship between growth rates of planktonic oligotrichous ciliates and temperature

斜率 Slope	拉丁名 Latin name	中文名 Chinese name	温度范围/℃ Temperature	n	参考文献 References
0.072	<i>Strombidinopsis multiauris</i>	多耳拟盗虫	5—15	36	[5]
0.052	<i>Favella</i> sp.	网纹虫属	8—18	4	[36]
0.077	<i>Favella</i> sp.	网纹虫属	7—20	3	[35]
0.072	<i>Tintinnopsis acuminata</i>	尖底拟铃虫	15—25	3	[38]
0.072	<i>Strombidium sulcatum</i>	具沟急游虫	20—30	5	[41]

n 为实验数据的个数

Montagnes^[11]认为现场的饵料水平无法判断是不是内禀生长率,所以只总结了当时已有实验室内的生长率资料,认为 Müller 和 Geller^[23]的公式最适合用来预测 *Strombilidium* 和 *Strombidium* 两个属的内禀生长率。

2.6 不同营养类型纤毛虫内禀生长率的差异

目前有关不同营养类型纤毛虫的内禀生长率有没有差异尚无定论。有的无壳纤毛虫是专性营养的,如 *Strombilidium conicum* 需要进行光合作用,在黑暗中培养 4 d 以后的生长率会下降。所以在进行不同种类的生长率实验时要注意它们的食性^[10]。Perez 等^[46]根据已有的文献中不同种类的生长率,用 Montagnes^[11]的公式总结了混合营养的种类和异养种类在内禀生长率上的差异,发现混合营养种类的生长率比相同体积的异养种类要低 0.5 d^{-1} ,而 Dolan 和 Perez^[48]在海水的营养盐加富培养中发现自养和异养的纤毛虫的生长率都能够随饵料浓度的增加迅速增加到 1.2 d^{-1} ,Gismervik^[10]也没有发现自养和异养纤毛虫在生长率方面的差异。

3 估计自然海区纤毛虫生长率的方法

自然海区纤毛虫生长率是自然界中的纤毛虫种群或群体在自然状况下(自然饵料、温度、光照和摇动)的生长率。要估计自然海区的生长率,可以用上述实验室的研究结果外推到自然界中^[49-50],但是室内培养的结果与自然界的状况有很大不同,自然环境对生长率的影响在实验室内是很难模拟的^[51],所以这种方法不是理想的方法。

其他方法有通过检测自然海区纤毛虫的分裂细胞频率(FDC, frequency-of-dividing-cells)来估计纤毛虫的生长率^[52],也可以根据摄食率和毛生长效率(GGE)来估计生长率,例如 Sherr 等^[53]估计如果西北地中海中粒级较小的纤毛虫($<15 \mu\text{m}$)只吃细菌的话,生长率可以达到 0.5 d^{-1} ^[47]。

估计自然海区纤毛虫生长率最好的方法是现场培养,首先使用这一方法的是 Stoecker 等^[35],他们在 1982 年春天在 Massachusetts 的海边测量了几种纤毛虫的生长率。此后这种方法逐渐推广开来。

现场培养纤毛虫估计其生长率的方法主要是海水分粒级培养法^[51, 54],即将海水用一定孔径的筛绢过滤,假设过滤去除了纤毛虫所有的捕食者,将海水

装入一定体积的培养瓶中在模拟的现场条件(水温、光照、摇动)下培养一段时间,根据培养前后纤毛虫丰度的变化计算生长率。

有关野外现场培养容器的选择上,人们经过了很长时间的探索。为了避免培养过程中的牢笼效应^[55],人们使用了很多方法。为了使培养水体与外界进行交换,Stoecker 等^[35]使用了微型生物笼(体积 400 mL),笼的两边有多孔(孔径 $12 \mu\text{m}$)的膜,允许笼内的水与外面交换,Verity^[54]和 Dolan^[56]分别使用了 2 L 和 0.6 L 的透析袋。有的研究使用较大的培养体积,如 Gilron 和 Lynn^[51]使用了 20 L 的培养体积,Landry 等^[57]使用 60 L 的培养体积。但是后来大多使用 2 L 的培养瓶。

纤毛虫通过分裂方式进行无性繁殖,这种繁殖有没有昼夜节律还没有统一的结论,Heinbokel^[52, 58]认为有节律,而 Verity^[38]则认为没有节律。用培养的方法得出的是纤毛虫在一段时间内分裂的结果,所以培养实验最好超过 1 d,实际上大多数培养的时间为 1 d。

但根据现场培养实验来估算生长率的一个问题是经常得出负值,例如 Verity 等^[59]稀释培养稀释度为零的一组中纤毛虫的生长率,3 个实验中得出 2 个负值。Levinsen 等^[60]发现培养 1 d 后纤毛虫死亡很多。Fileman 等^[61]的实验中有一半的结果是负值。

由于纤毛虫非常脆弱,培养过程中对海水的转移、过滤等操作都可能造成纤毛虫死亡,所以对于出现负值的原因,很多作者很难确定是自然界的实际情况,还是操作造成的。

为减少实验操作对纤毛虫的影响,现在大多数培养中使用逆向过滤的方法,即将筛绢装在两端开口的圆筒的一端,将筛绢的一端浸入水中,开口的一端向上露出液面,将圆筒中的海水取出(虹吸或用容器如烧杯舀出)。但是这种操作本身对这些纤毛虫的影响也没有评估。

海水分粒级培养法假设过滤去除了纤毛虫的所有捕食者,但是,有些纤毛虫的捕食者(例如 *Didinium* spp.和砂壳纤毛虫 *Favella* sp.等其他捕食性的纤毛虫、异养甲藻和寄生甲藻)与纤毛虫处于同一粒级,甚至小于后者,所以不可避免的部分或全部通过了筛绢^[47]。另外,实验室培养的纤毛虫在饵料不足时还出现自食现象^[62],一些甲藻的分泌物能降低

纤毛虫的生长率^[15, 33],这些现象在自然界也可能发生。因此海水分粒级培养法得出的生长率数据是保守估计。

4 现场纤毛虫生长率的研究结果

自 Stoecker 等^[35]后, Tumantseva 和 Kopylov^[26], Verity^[54], Gilron 和 Lynn^[51] 及 Dolan^[56] 研究了几种

纤毛虫(多为砂壳纤毛虫)的生长率(表 4),因为这些研究不是针对纤毛虫群体的,所以 Sherr 和 Sherr^[63] 认为还没有有效的现场纤毛虫生长率的资料。1993 年以后,纤毛虫群体的现场生长率测定得到重视,但是目前的文献较少^{26,43,47,50-70}(表 5),研究海区主要在温带近岸区域(图 3)。这些资料显示现场纤毛虫的生长率的最大值为 3.3 d⁻¹。

表 4 不同海区现场培养得出的砂壳纤毛虫生长率

Table 4 Growth rates of tintinnids by *in situ* incubations

海区 Place	拉丁名 Latin name	中文名 Chinese name	温度/℃ Temperature	培养时间/h Time	生长率/d ⁻¹ Growth rates	参考文献(培养方法) References (cultural methods)
长岛湾	<i>Tintinnopsis vasculum</i>	小管拟铃虫	2	16	0.10	[3]
	<i>Tintinnopsis beroidea</i>	百乐拟铃虫	15	24	0.16	(直径 28.6 mm、12000—14000 分子重量的透析袋,容积 50 mL)
	<i>Stenosemella oliva</i>	橄榄领细壳虫	20	19	0.19	
夏威夷海区	<i>Tintinnina</i>	砂壳纤毛虫			0.43—0.67	[52]分裂细胞频率法(FDC, frequency-of-dividing-cells 法)
Massachusetts 海湾	<i>Favella</i> sp.	网纹虫属	15—21	24	0.19—0.76	[35]
	<i>Eutintinnus pectinis</i>	栉真铃虫			0.04—0.72	(417 mL 浮游生物笼,孔径 12 μm, 64 μm 过滤海水)
	<i>Tintinnopsis kofoidi</i>	寇氏拟铃虫			1.63	
Narragansett 湾	<i>Eutintinnus pectinis</i>	栉真铃虫	0—24	24	1.7 (1.2—2.2)	[54]
	<i>Eutintinnus</i> sp.	真铃虫属			1.7 (0.8—2.2)	(2 L 透析袋, 200 μm 过滤海水)
	<i>Favella</i> sp.	网纹虫属			1.3	
	<i>Helicostomella subulata</i>	钻形旋口虫			0.7(0—2.0)	
	<i>Metacylis annulifera</i>	喙型类杯虫			0.7(0—2.0)	
	<i>Stenosemella oliva</i>	橄榄领细壳虫			0.7(0.2—2.2)	
	<i>Stenosemella steini</i>	斯坦氏领细壳虫			0.5(0—1.9)	
	<i>Stenosemella ventricosa</i>	大腹领细壳虫			0.4(0.4—0.5)	
	<i>Tintinnidium fluviatile</i>	淡水筒壳虫			1.0(0—1.6)	
	<i>Tintinnopsis acuminata</i>	尖底拟铃虫			1.1(0—2.7)	
	<i>Tintinnopsis baltica</i>	波罗地拟铃虫			0.9(0.2—2.0)	
	<i>Tintinnopsis beroidea</i>	百乐拟铃虫			1.5(0.6—2.4)	
	<i>Tintinnopsis dadayi</i>	达氏拟铃虫			1.9	
	<i>Tintinnopsis kofoidi</i>	寇氏拟铃虫			1.0(0.7—1.3)	
	<i>Tintinnopsis levigata</i>	光亮拟铃虫			1.4	
	<i>Tintinnopsis minuta</i>	最小拟铃虫			1.8(0.3—3.3)	
	<i>Tintinnopsis parva</i>	微细拟铃虫			0.7(0—1.2)	
	<i>Tintinnopsis rapa</i>	圆锥拟铃虫			0.5(0—1.3)	
	<i>Tintinnopsis tubulosoides</i>	筒状拟铃虫			0.8(0—1.9)	
	<i>Tintinnopsis undella</i>	波膜拟铃虫			0.6(0.1—0.9)	
	<i>Tintinnopsis vasculum</i>	小管拟铃虫			0.8(0.2—1.5)	

续表

海区 Place	拉丁名 Latin name	中文名 Chinese name	温度/℃ Temperature	培养时间/h Time	生长率/d ⁻¹ Growth rates	参考文献 (培养方法) References (cultural methods)
	<i>Tintinnopsis ventricosoides</i>	侧涨拟铃虫			0.5(0.1—1.0)	
牙买加金斯敦港	<i>Tintinnopsis lobiancoi</i>	弯叶拟铃虫	27—29	24	1.22 (0.48—2.55)	[51]
	<i>Tintinnopsis</i> spp.	拟铃虫属			0.82(0—1.62)	(20 L 培养瓶, 200 μm 过滤海水)
					0.57(0—1.2)	
	<i>Stenosemella oliva</i>	橄榄领细壳虫			0.6(0.07—1.50)	
	<i>Eutintinnus macilentus</i>	细瘦真铃虫			0.96 (0.28—1.25)	
					0.71 (0.29—1.25)	

表 5 不同海区现场培养得出的纤毛虫群落的生长率

Table 5 Growth rates of ciliate community by *in situ* incubations

海区 Place	纤毛虫类群 Ciliate community	培养瓶体积 Culture bottles' volume	培养温度/℃ Temperature	培养时间 Time	过滤网径、是否逆向过滤 Mesh size, inverse filtrated or not	生长率/d ⁻¹ Growth rates	参考文献 References
秘鲁近岸沿海	<i>Strobilidium conicum</i>	10 L	23.8—26	8—24 h	没有过滤	1.13	[26]
Kattegat Bay	无壳纤毛虫	620 mL	14	24 h	180 μm	<0.09	[65]
切萨皮克湾	<i>Strobilidium</i> sp.	600 mL 透析袋	7.4—26.8	12 h	64 μm	1.45—1.55	[56]
	<i>Strombidium</i> sp.					0.75 —0.92	
北大西洋	纤毛虫群体	2 L	13—14	24 h, 6, 12, 24 h	10 μm、200 μm 逆向过滤	0.3—0.9	[59]
亚北极太平洋	纤毛虫群体	60 L 围隔	7	6d	500 μm	0.06—0.10	[57]
俄勒冈外海	纤毛虫群体	2 L	10	24 h	200 μm 逆向过滤	-1.38—1.06	[66]
丹麦 Kattegat	纤毛虫群体	2.4 L	4—18	24 h	200 μm、50 μm 逆向过滤	0.2—2.5	[47]
普利茅斯湾	纤毛虫群体	2.5 L	15.8	24 h	200 μm、10 μm、5 μm 逆向过滤	平均 0.57	[64]
巴伦支海	纤毛虫群体	2 L	-2—4	48 h	100 μm 逆向过滤	0.29—0.73 平均 0.4	[67]
长岛湾	纤毛虫群体	2 L	3—29	24 h	200 μm、64 μm 逆向过滤	最大 1.24	[68]
地中海西北部	<i>Strombidium</i> sp.	2 L	14—16	24 h	200 μm、64 μm 逆向过滤	0—0.46	[46]
格陵兰 Disko Bay	纤毛虫群体	2.5 L	1.4	4 d	160 μm 逆向过滤	0.03—0.47	[60]
罗斯海	无壳纤毛虫	1.2 L	0	36—78 h	64 μm 逆向过滤	0.01—0.69	[69]
	砂壳纤毛虫					0.07—1.0	
巴伦支海	无壳纤毛虫	2.3 L	-1.8—4	48 h	100 μm 逆向过滤	最大 0.84	[43]
	砂壳纤毛虫					最大 0.59	
Galicja 外海	无壳纤毛虫	1.2 L	15.5—18	24 h	200 μm	最大 0.52	[70]
英吉利海峡	<20 μm Choroetrich		10—16	24 h	200 μm	0—0.61	[61]
	>20 μm Choroetrich					0—0.35	

4.1 现场纤毛虫生长率结果与温度的关系

在现场的生长率同样得出生长率随温度升高而增加的趋势。Verity^[54]在 Narragansett Bay 测定了 20

多种砂壳纤毛虫周年温度为 0—25 ℃ 的生长率和温度的关系为 $Q_{10} = 1.8$ 。Dolan^[56]在 Chesapeake Bay 4 月、6 月和 8 月得出以 pico 级浮游生物为食的纤毛

虫群体的生长率在 7.4—26.8 °C 生长率和温度的关系为 $Q_{10} = 2$ 。Nielsen 和 Kiorboe^[47] 在丹麦 Kattegat Bay 将纤毛虫分为 3 个粒级 (10—15 μm 、30 μm 、40—60 μm), 进行了一周年的生长率调查, 3 个粒级

的 Q_{10} 为 2.2—3.0, 平均为 2.6。Hansen 等^[44] 总结了体长为 2—2000 μm 的浮游动物的摄食率和生长率的 Q_{10} 的平均值为 2.8, 此后, Levinsen 等^[60] 和 Hansen 等^[43] 都用 $Q_{10} = 2.8$ 。

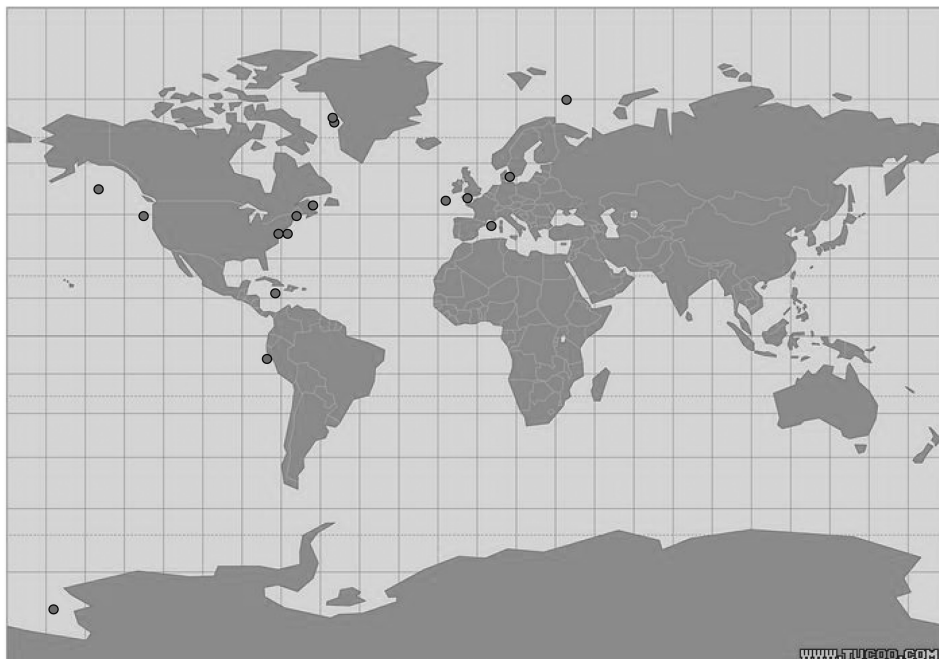


图 3 自然海区现场的浮游纤毛虫生长率的测定地点 (•) 分布图

Fig.3 Locations of *in situ* incubation stations for planktonic ciliate growth rates

Nielsen 和 Kiorboe^[47] 用 $Q_{10} = 2.6$ 测量了不同粒级纤毛虫生长率的季节变化, 发现 3 个粒级异养纤毛虫 (10—15 μm 、30 μm 、40—60 μm) 和自养纤毛虫 *Laboea strobila* (55 μm) 的生长率有共同的季节变化: 春季生长率开始增加, 7 月和 8 月生长率最高, 秋季降低。

Nielsen 和 Kiorboe^[47] 利用现场实验的数据, 得出纤毛虫生长率和温度 (T)、纤毛虫体积 (V) 的关系为:

$$\ln(\mu) = 0.095T - 0.243 \ln(V) + 1.1569$$

Levinsen 等^[60] 在格陵兰一个海湾在 1.4 °C 下进行培养得出的纤毛虫生长率高于用 Müller 和 Geller^[23] 的公式计算出的数值, Levinsen 等^[60] 认为 Müller 和 Geller^[23] 的公式是根据较高温度 (17 ± 6) °C 下得出的数值回归的, 不太适用于低温条件下的情况, 极地生物可能具有适应极端环境的能力, 需要更多的研究完善这个公式。

4.2 现场纤毛虫生长受上行控制的作用

在某一时刻, 比较现场培养得出的纤毛虫生长

率和用细胞大小及温度模型得出的纤毛虫内禀生长率, 可以用来估计这个时刻纤毛虫在现场的饵料供应情况。Gilron 和 Lynn^[51] 在寡营养的热带发现实际测得的生长率比模型得出的生长率低一个量级, 所以这个海区纤毛虫饵料不足。Leakey 等^[64] 发现在 Sutton Harbor 这两个数值相差不大, 因此纤毛虫的饵料供应是充足的。Nielsen 和 Kiorboe^[47] 发现除了小型的纤毛虫外, 优势纤毛虫类群的生长率与饵料浓度关系不大且都接近内禀生长率, 因此, 这些优势类群的饵料是充足的, 而小型纤毛虫的饵料是细菌, 它们的饵料浓度不足, 因此生长率不高。而那些不占优势的类群因饵料不足, 生长率较低。

纤毛虫的生长率受温度和饵料的共同影响, 对于纤毛虫周年的生长率变化, Nielsen 和 Kiorboe^[47] 认为温度变化对生长率变化的贡献为 75%—97%, 纤毛虫很少受到饵料不足的影响。

4.3 水华期纤毛虫的生长情况

实验室中得出的纤毛虫的生长率接近甚至超过许多浮游植物在最佳培养条件下的生长率 (0.5—2

d^{-1})^[63],也超过一些异养甲藻的生长率^[22],所以纤毛虫被认为对浮游植物丰度的变化反应迅速,和异养甲藻一起,可以有效抑制初起水华^[22],这也被认为是高营养盐低叶绿素(HNLC, High Nutrient Low Chlorophyll a)海区浮游植物叶绿素浓度低的原因(例如 Miller 等^[71], Sherr 和 Sherr^[63], Sherr 和 Sherr^[72])。

但是自然条件下观察到纤毛虫在水华前期的生长是很少的,在一些赤潮研究中,在赤潮的中后期发现纤毛虫的丰度很高,例如 Admiraal 和 Venekamp^[73]发现在北海的 *Phaeocystis pouchetii* 发生赤潮时有两种砂壳纤毛虫的丰度很高。但是也有一些调查发现,在一些水华期间,微型浮游动物(包括纤毛虫)丰度很低,如 Bjornsen 和 Nielsen^[74]及 Nielsen 等^[75]。在自然界会遇到单种或几种纤毛虫丰度很高的情况,由于当时的饵料并不是很高,所以物理的汇聚作用也是纤毛虫浓度高的原因之一,但也不排除此前可能发生过饵料浓度高的情况,只是没有被监测到。因为纤毛虫迅速生长的空间小,时间短,所以现场观测到纤毛虫丰度升高和降低的资料几乎没有。在这些纤毛虫丰度升高的事件中,每次事件只有一种或几种纤毛虫丰度升高,是优势种,所以特定饵料种类对应特定纤毛虫种类的营养关系很重要^[5, 76]。

在人为制造的水华事件中可以监测纤毛虫的变化,其中最著名的是在 HNLC 海区进行铁加富实验制造的水华,但是在这些实验中,纤毛虫的动态不同。例如,在亚北极太平洋,在 Landry 等^[57]用围隔制造的水华中,纤毛虫生长率并没有随之增加,作者怀疑实验水体中的小型桡足类、捕食性的纤毛虫和异养甲藻限制了植食性纤毛虫的丰度。在东赤道太平洋进行的现场铁加富实验表明,在添加铁后,浮游植物生长, $>20\ \mu\text{m}$ 的纤毛虫的生物量也增加^[77],在亚北极太平洋进行的现场铁加富实验 SEEDS 计划中,在加富水体中从加富的第 2 天到第 13 天纤毛虫丰度减少^[78]。在南大洋进行的现场铁加富实验 EisenEx 计划中,纤毛虫在加富水体中并没有明显升高的趋势^[79]。

4.4 缺氧对纤毛虫生长的影响

缺氧对纤毛虫的生长有不同的影响。在 Chesapeake 湾,6 月下层水体发生缺氧,在缺氧区有与上层不同的纤毛虫群落,生长率是上层纤毛虫的

两倍,达 $1.18\text{--}2.36\ \text{d}^{-1}$ 。在 8 月的缺氧区,上层和下层缺氧区的纤毛虫群落是相同的,但是缺氧区的纤毛虫几乎不生长^[56]。

5 纤毛虫的生产力

根据纤毛虫生长率和生物量就可以估计纤毛虫的生产力, Lynn 和 Montagnes^[80]根据当时已经报导的纤毛虫生物量数据,估计全球不同海区纤毛虫的生产力,由于当时缺乏生长率的资料,他们的估计使用了一个数值: $0.69\ \text{d}^{-1}$ (即加倍时间为 1d),所以是很简单的估计。

大多数对纤毛虫生产力的估计是根据纤毛虫生长率和生物量,与桡足类的生产力相比,纤毛虫的生产力较大。在 Solent Estuary,砂壳纤毛虫的年生产力为 $0.6\ \text{mg C/L}$ ^[49];在 Kattegat Bay,纤毛虫群落(包括红色中缢虫)的年生产力为 $57\ \text{g C/m}^2$ 或 $2\ \text{g C/m}^3$,桡足类群体的生产力为 $12\ \text{g C m}^{-2}\ \text{a}^{-1}$ ^[47];在 Narragansett Bay,从 3 月到 10 月,砂壳纤毛虫群体的生产力日平均为 $14\ \text{mg C/m}^3$,年生产力为 $3.3\ \text{g C/m}^3$,桡足类的生产力为 $13\ \text{mg C m}^{-3}\ \text{d}^{-1}$ ^[81];在 Southampton Water,浮游纤毛虫的日生产力为 $<1\text{--}141\ \text{mg C/m}^3$,年生产力为 $2.2\text{--}9.2\ \text{g C/m}^3$,而桡足类生产力为 $0.6\text{--}1.6\ \text{g C m}^{-3}\ \text{a}^{-1}$ ^[50];在 Gulf of Maine 纤毛虫的生产力为 $0.16\ \text{g C m}^{-3}\ \text{a}^{-1}$ ^[45];在 Georgia estuary,夏季无壳纤毛虫群体($<20\ \mu\text{m}$)的生产力在潮溪内为 $1.2\ \text{mg C m}^{-3}\ \text{h}^{-1}$,在河口为 $0.03\ \text{mg C m}^{-3}\ \text{h}^{-1}$,冬季则分别为 $0.05\ \text{mg C m}^{-3}\ \text{h}^{-1}$ 和 $0.07\ \text{mg C m}^{-3}\ \text{h}^{-1}$ ^[82]。

Zervoudaki 等^[83]利用纤毛虫最大清滤率、摄食率和毛生长率 $0.33\ \text{d}^{-1}$ 来估计纤毛虫的生产力,在土耳其海峡纤毛虫生产力为 $0.2\text{--}41\ \text{mg C m}^{-2}\ \text{d}^{-1}$ 。

6 小结

综上所述,国外在实验室内和海上现场对浮游纤毛虫的生长率已进行了比较广泛的研究。在实验室内 12 种砂壳纤毛虫的内禀生长率变化范围为 $0.45\text{--}2.7\ \text{d}^{-1}$;22 种无壳纤毛虫的内禀生长率(除 *Strombidium sulcatum* 的内禀生长率可达 $8.3\ \text{d}^{-1}$ 外)变化范围为 $0.1\text{--}3.05\ \text{d}^{-1}$ 。纤毛虫内禀生长率与饵料种类、温度等有密切关系。虽然纤毛虫内禀生长率高于浮游植物内禀生长率,但是在自然海区纤毛

虫随水华发生而迅速增长的情况并不常见。现场培养(海水分粒级培养法)是估计自然海区纤毛虫生长率的常用方法,目前研究的海区主要局限在温带近岸海区,热带和寒带大洋海区的资料较少。对纤毛虫次级生产的研究表明纤毛虫次级生产大于桡足类次级生产。

References:

- [1] Azam F, Fenchel T, Field J G, Gray J S, Meyerreil L A, Thingstad F. The ecological role of water-column microbes in the sea. *Marine Ecology Progress Series*, 1983, 10(3): 257-263.
- [2] Heinbokel J F. Studies on the functional role of tintinnids in the Southern California Bight. I. Grazing and growth rates in laboratory cultures. *Marine Biology*, 1978, 47(2): 177-189.
- [3] Capriulo G M. Feeding of field collected tintinnid microzooplankton on natural food. *Marine Biology*, 1982, 71(1): 73-86.
- [4] Lei Y L, Xu K D, Song W B. Ecological and morphological studies on *Strombidium sulcatum*, a harmful ciliate during algae cultivation. *Journal of Fishery Sciences of China*, 1996, 3(4): 39-47.
- [5] Montagnes D J S, Lessard E J. Population dynamics of the marine planktonic ciliate *Strombidinopsis multiauris*: its potential to control phytoplankton blooms. *Aquatic Microbial Ecology*, 1999, 20(2): 167-181.
- [6] Fenchel T, Jonsson P R. The functional biology of *Strombidium sulcatum*, a marine oligotrich ciliate (Ciliophora, Oligotrichina). *Marine Ecology Progress Series*, 1988, 48(1): 1-15.
- [7] Ohman M D, Snyder R A. Growth kinetics of the omnivorous oligotrich ciliate *Strombidium* sp. *Limnology and Oceanography*, 1991, 36(5): 922-935.
- [8] Stoecker D K, Silver M W, Michaels A E, Davis L H. Obligate mixotrophy in *Laboea strobila*, a ciliate which retains chloroplasts. *Marine Biology*, 1988, 99(3): 415-423.
- [9] Putt M, Stoecker D K. An experimentally determined carbon: Volume ratio for marine oligotrichous ciliates from estuarine and coastal waters. *Limnology and Oceanography*, 1989, 34(6): 1097-1103.
- [10] Gismervik I. Numerical and functional responses of choreo- and oligotrich planktonic ciliates. *Aquatic Microbial Ecology*, 2005, 40(2): 163-173.
- [11] Montagnes D J S. Growth responses of planktonic ciliates in the genera *Strobilidium* and *strombidium*. *Marine Ecology Progress Series*, 1996, 130(1): 241-254.
- [12] Jonsson P R. Particle size selection, feeding rates and growth dynamics of marine planktonic oligotrichous ciliates (Ciliophora, Oligotrichina). *Marine Ecology Progress Series*, 1986, 33(3): 265-277.
- [13] Verity P G. Measurement and simulation of prey uptake by marine planktonic ciliates fed plastidic and aplastidic nanoplankton. *Limnology and Oceanography*, 1991, 36(4): 729-750.
- [14] Stoecker D, Guillard R R L, Kavee R M. Selective predation by *Favella ehrenbergii* (Tintinnia) on and among dinoflagellates. *Biological Bulletin*, 1981, 160(1): 136-145.
- [15] Verity P G, Stoecker D. Effects of *Olisthodiscus luteus* on the growth and abundance of tintinnids. *Marine Biology*, 1982, 72(1): 79-87.
- [16] Clough J, Strom S. Effects of *Heterosigma akashiwo* (Raphidophyceae) on protist grazers: laboratory experiments with ciliates and heterotrophic dinoflagellates. *Aquatic Microbial Ecology*, 2005, 39(2): 121-134.
- [17] Rose J M, Fitzpatrick E, Wang A, Gast R J, Caron D A. Low temperature constrains growth rates but not short-term ingestion rates of Antarctic ciliates. *Polar Biology*, 2013, 36(5): 645-659.
- [18] Pedersen M F, Hansen P J. Effects of high pH on the growth and survival of six marine heterotrophic protists. *Marine Ecology Progress Series*, 2003, 260: 33-41.
- [19] Montagnes D J S, Berger J D, Taylor F J R. Growth rate of the marine planktonic ciliate *Strombidinopsis cheshiri* Snyder and Ohman as a function of food concentration and interclonal variability. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 1996, 206(1): 121-132.
- [20] Buskey E J, Hyatt C J. Effects of the Texas (USA) 'brown tide' alga on planktonic grazers. *Marine Ecology Progress Series*, 1995, 126(1): 285-292.
- [21] Jeong H J, Shim J H, Lee C W, Kim J S, Koh S M. Growth and grazing rates of the marine planktonic ciliate *Strombidinopsis* sp. on red-tide and toxic dinoflagellates. *Journal of Eukaryotic Microbiology*, 1999, 46(1): 69-76.
- [22] Strom S L, Morello T A. Comparative growth rates and yields of ciliates and heterotrophic dinoflagellates. *Journal of Plankton Research*, 1998, 20(3): 571-584.
- [23] Müller H, Geller W. Maximum growth rates of aquatic ciliated protozoa the dependence on body size and temperature reconsidered. *Archiv Fur Hydrobiologie*, 1993, 126(3): 315-327.
- [24] Chen B Z, Liu H B, Lau M T S. Grazing and growth responses of a marine oligotrichous ciliate fed with two nanoplankton; does food quality matter for micrograzers?. *Aquatic Ecology*, 2010, 44(1): 113-119.
- [25] Stoecker D K, Silver M W. Replacement and aging of chloroplasts in *Strombidium capitatum* (Ciliophora, Oligotrichida). *Marine Biology*, 1990, 107(3): 491-502.
- [26] Tumantseva N, Kopylov A. Reproduction and production rates of planktic infusoria in coastal waters of Peru. *Oceanology of the Academy of Sciences of the USSR*, 1985, 25(3): 390-394.
- [27] Rivier A, Brownlee D, Sheldon R, Rassoulzadegan F. Growth of microzooplankton: A comparative study of bacterivorous zooflagellates and ciliates. *Marine Microbial Food Webs*, 1985, 1(1): 51-60.
- [28] Allali K, Dolan J, Rassoulzadegan F. Culture characteristics and orthophosphate excretion of a marine oligotrich ciliate,

- Strombidium sulcatum*, fed heat-killed bacteria. Marine Ecology Progress Series, 1994, 105(1/2): 159-165.
- [29] Martinez E A. Effects of temperature and food concentration on competitive interaction in three species of marine Ciliophora. Caribbean Journal of Science, 1983, 19: 1-7.
- [30] Montagnes D J S, Kimmance S A, Atkinson D. Using Q_{10} : Can growth rates increase linearly with temperature? Aquatic Microbial Ecology, 2003, 32(3): 307-313.
- [31] Kamiyama T. Growth and grazing responses of tintinnid ciliates feeding on the toxic dinoflagellate *Heterocapsa circularisquama*. Marine Biology, 1997, 128(3): 509-515.
- [32] Hansen P J. Growth and grazing response of a ciliate feeding on the red tide dinoflagellate *Gyrodinium aureolum* in monoculture and in mixture with a non-toxic alga. Marine Ecology Progress Series, 1995, 121(1/3): 65-72.
- [33] Hansen P J. The red tide dinoflagellate *Alexandrium tamarense*: effects on behavior and growth of a tintinnid ciliate. Marine Ecology Progress Series, 1989, 53(2): 105-116.
- [34] Rosetta C H, McManus G B. Feeding by ciliates on two harmful algal bloom species, *Prymnesium parvum* and *Prorocentrum minimum*. Harmful Algae, 2003, 2(2): 109-126.
- [35] Stoecker D, Davis L H, Provan A. Growth of *Favella* sp. (Ciliata, Tintinnina) and other microzooplankters in cages incubated *in situ* and comparison to growth *in vitro*. Marine Biology, 1983, 75(2/3): 293-302.
- [36] Aelion C M, Chisholm S W. Effect of temperature on growth and ingestion rates of *Favella* sp. Journal of Plankton Research, 1985, 7(6): 821-830.
- [37] Verity P G, Villareal T A. The relative food value of diatoms, dinoflagellates, flagellates, and cyanobacteria for tintinnid ciliates. Archiv Für Protistenkunde, 1986, 131(1): 71-84.
- [38] Verity P G. Grazing, respiration, excretion, and growth rates of tintinnids. Limnology and Oceanography, 1985, 30(6): 1268-1282.
- [39] Gold K. Growth characteristics of the mass-reared tintinnid *Tintinnopsis beroidea*. Marine Biology, 1971, 8(2): 105-108.
- [40] Gold K. Methods for growing tintinnida in continuous culture. American Zoologist, 1973, 13(1): 203-208.
- [41] Martinez E A. Sensitivity of marine ciliates (Protozoa, Ciliophora) to high thermal stress. Estuarine and Coastal Marine Science, 1980, 10(4): 369-381.
- [42] Gismervik I, Andersen T, Vadstein O. Pelagic food webs and eutrophication of coastal waters: Impact of grazers on algal communities. Marine Pollution Bulletin, 1996, 33(1): 22-35.
- [43] Hansen B W, Jensen F. Specific growth rates of protozooplankton in the marginal ice zone of the central Barents Sea during spring. Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom, 2000, 80(1): 37-44.
- [44] Hansen P J, Bjørnsen P K, Hansen B W. Zooplankton grazing and growth: Scaling within the 2—2,000 μm body size range. Limnology and Oceanography, 1997, 42(4): 687-704.
- [45] Montagnes D J S, Lynn D H, Roff J C, Taylor W D. The annual cycle of heterotrophic planktonic ciliates in the waters surrounding the isles of shoals, Gulf of Maine: An assessment of their trophic role. Marine Biology, 1988, 99(1): 21-30.
- [46] Pérez M T, Dolan J R, Fukai E. Planktonic oligotrich ciliates in the NW Mediterranean: growth rates and consumption by copepods. Marine Ecology Progress Series, 1997, 155: 89-101.
- [47] Nielsen T G, Kiorboe T. Regulation of zooplankton biomass and production in a temperate, coastal ecosystem. 2. ciliates. Limnology and Oceanography, 1994, 39(3): 508-519.
- [48] Dolan J R, Perez M T. Costs, benefits and characteristics of mixotrophy in marine oligotrichs. Freshwater Biology, 2000, 45(2): 227-238.
- [49] Burkill P H. Ciliates and other microplankton components of a nearshore food-web: Standing stocks and production processes. Annales De L Institut Oceanographique, 1982, 58: 335-349.
- [50] Leakey R J G, Burkill P H, Sleight M A. Planktonic ciliates in Southampton Water: Abundance, biomass, production, and role in pelagic carbon flow. Marine Biology, 1992, 114(1): 67-83.
- [51] Giron G L, Lynn D H. Estimates of *in situ* population growth rates of four tintinnine ciliate species near Kingston Harbour, Jamaica. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1989, 29(1): 1-10.
- [52] Heinbokel J. Diel periodicities and rates of reproduction in natural populations of tintinnines in the oligotrophic waters off Hawaii, September 1982. Marine Microbial Food Webs, 1987, 2(1): 1-14.
- [53] Sherr E B, Rassoulzadegan F, Sherr B F. Bacterivory by pelagic choreotrichous ciliates in coastal waters of the NW Mediterranean Sea. Marine Ecology Progress Series, 1989, 55(2): 235-240.
- [54] Verity P G. Growth-rates of natural tintinnid populations in Narragansett Bay. Marine Ecology Progress Series, 1986, 29(2): 117-126.
- [55] Roman M R, Rublee P A. Containment effects in copepod grazing experiments: a plea to end the black box approach. Limnology and Oceanography, 1980, 25(6): 982-990.
- [56] Dolan J R. Microphagous ciliates in mesohaline chesapeake bay waters: Estimates of growth rates and consumption by copepods. Marine Biology, 1991, 111(2): 303-309.
- [57] Landry M R, Gifford D J, Kirchman D L, Wheeler P A, Monger B C. Direct and indirect effects of grazing by *Neocalanus plumchrus* on plankton community dynamics in the subarctic Pacific. Progress in Oceanography, 1993, 32(1): 239-258.
- [58] Heinbokel J F. Reproductive rates and periodicities of oceanic tintinnine ciliates. Marine Ecology Progress Series, 1988, 47(3): 239-248.
- [59] Verity P G, Stoecker D K, Sieracki M E, Nelson J R. Grazing, Growth and mortality of microzooplankton during the 1989 North Atlantic Spring Bloom at 47° N, 18° W. Deep-Sea Research I, 1993, 40(9): 1793-1814.
- [60] Levinsen H, Nielsen T G, Hansen B W. Plankton community structure and carbon cycling on the western coast of Greenland during the stratified summer situation. II. Heterotrophic dinoflagellates and ciliates. Aquatic Microbial Ecology, 1999, 16

- (3): 217-232.
- [61] Fileman E, Petropavlovsky A, Harris R. Grazing by the copepods *Calanus helgolandicus* and *Acartia clausi* on the protozooplankton community at station L4 in the Western English Channel. *Journal of Plankton Research*, 2010, 32(5): 709-724.
- [62] Gifford D J. Laboratory culture of marine planktonic Oligotrichs (Ciliophora, Oligotrichida). *Marine Ecology Progress Series*, 1985, 23(3): 257-267.
- [63] Sherr E B, Sherr B F. Bacterivory and herbivory: key roles of phagotrophic protists in pelagic food webs. *Microbial Ecology*, 1994, 28(2): 223-235.
- [64] Leahey R J G, Burkill P H, Sleight M A. Ciliate growth rates from Plymouth Sound: Comparison of direct and indirect estimates. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 1994, 74(4): 849-861.
- [65] Tiselius P. Contribution of aloricate ciliates to the diet of *Acartia clausi* and *Centropages hamatus* in coastal waters. *Marine Ecology Progress Series*, 1989, 56(1): 49-56.
- [66] Fessenden L, Cowles T J. Copepod predation on phagotrophic ciliates in Oregon coastal waters. *Marine Ecology Progress Series*, 1994, 107(1/2): 103-111.
- [67] Hansen B, Christiansen S, Pedersen G. Plankton dynamics in the marginal ice zone of the central Barents Sea during spring: Carbon flow and structure of the grazer food chain. *Polar Biology*, 1996, 16(2): 115-128.
- [68] Lonsdale D J, Cospér E M, Kim W S, Doall M, Divadeenam A, Jonasdottir S H. Food web interactions in the plankton of Long Island bays, with preliminary observations on brown tide effects. *Marine Ecology Progress Series*, 1996, 134(1/3): 247-263.
- [69] Lonsdale D J, Caron D A, Dennett M R, Schaffner R. Predation by *Oithona* spp. on protozooplankton in the Ross Sea, Antarctica. *Deep-Sea Research II*, 2000, 47(15/16): 3273-3283.
- [70] Fileman E, Burkill P. The herbivorous impact of microzooplankton during two short-term Lagrangian experiments off the NW coast of Galicia in summer 1998. *Progress in Oceanography*, 2001, 51(2): 361-383.
- [71] Miller C, Frost B, Booth B, Wheeler P, Landry M, Welschmeyer N. Ecological processes in the subarctic Pacific: iron limitation cannot be the whole story. *Oceanography*, 1991, 4(2): 71-78.
- [72] Sherr E B, Sherr B F. Capacity of herbivorous protists to control initiation and development of mass phytoplankton blooms. *Aquatic Microbial Ecology*, 2009, 57(3): 253-262.
- [73] Admiraal W, Venekamp L A H. Significance of tintinnid grazing during blooms of *Phaeocystis pouchetii* (Haptophyceae) in Dutch coastal waters. *Netherlands Journal of Sea Research*, 1986, 20(1): 61-66.
- [74] Bjørnsen P K, Nielsen T G. Decimeter scale heterogeneity in the plankton during a pycnocline bloom of *Gyrodinium aureolum*. *Marine Ecology Progress Series*, 1991, 73(2): 263-267.
- [75] Nielsen T G, Kjørboe T, Bjørnsen P K. Effects of a *Chrysochromulina-Polylepis* subsurface bloom on the planktonic community. *Marine Ecology Progress Series*, 1990, 62(1): 21-35.
- [76] Tillmann U. Interactions between planktonic microalgae and protozoan grazers. *Journal of Eukaryotic Microbiology*, 2004, 51(2): 156-168.
- [77] Landry M R, Constantinou J, Latasa M, Brown S L, Bidigare R R, Ondrusek M E. Biological response to iron fertilization in the eastern equatorial Pacific (IronEx II). III. Dynamics of phytoplankton growth and microzooplankton grazing. *Marine Ecology Progress Series*, 2000, 201: 57-72.
- [78] Saito H, Suzuki K, Hinuma A, Ota T, Fukami K, Kiyosawa H, Saino T, Tsuda A. Responses of microzooplankton to *in situ* iron fertilization in the western subarctic Pacific (SEEDS). *Progress in Oceanography*, 2005, 64(2): 223-236.
- [79] Henjes J, Assmy P, Klaas C, Verity P, Smetacek V. Response of microzooplankton (protists and small copepods) to an iron-induced phytoplankton bloom in the Southern Ocean (EisenEx). *Deep-Sea Research Part I*, 2007, 54(3): 363-384.
- [80] Lynn D H, Montagnes D J S, Dale T, Gilron G L, Strom S L. A Reassessment of the Genus *Strombidinopsis* (Ciliophora, Choreotrichida) with descriptions of 4 new planktonic species and remarks on its taxonomy and phylogeny. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 1991, 71(3): 597-612.
- [81] Verity P G. Abundance, community composition, size distribution, and production rates of tintinnids in Narragansett Bay, Rhode-Island. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 1987, 24(5): 671-690.
- [82] Sherr E B, Sherr B F, Fallon R D, Newell S Y. Small, aloricate ciliates as a major component of the marine heterotrophic nanoplankton. *Limnology and Oceanography*, 1986, 31(1): 177-183.
- [83] Zervoudaki S, Christou E D, Assimakopoulou G, Örek H, Gucu A C, Giannakourou A, Pitta P, Terbiyik T, Yucel N, Moutsopoulos T, Pagou K, Psarra S, Özsoy E, Papathanassiou E. Copepod communities, production and grazing in the Turkish Straits System and the adjacent northern Aegean Sea during spring. *Journal of Marine Systems*, 2011, 86(3): 45-56.

参考文献:

- [4] 类彦立, 徐奎栋, 宋微波. 单胞藻培养中一敌害纤毛虫——具沟急游虫的生态习性及其形态学初探. *中国水产科学*, 1996, 3(4): 39-47.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.34, No.8 Apr., 2014 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Growth rates of marine planktonic ciliates; a review ZHANG Wuchang, LI Haibo, FENG Meiping, et al (1897)
- Research status and prospects on functions of urban forests in regulating the air particulate matter
..... WANG Xiaolei, WANG Cheng (1910)
- A review of snow-living Collembola ZHANG Bing, NI Zhen, CHANG Liang, et al (1922)

Autecology & Fundamentals

- Photosynthetic responses to changes in CO₂ concentration and soil moisture in leaves of *Securinega suffruticosa* from shell ridge
islands in the Yellow River Delta, China ZHANG Shuyong, XIA Jiangbao, ZHANG Guangcan, et al (1937)
- Quantities and spectral characteristics of DOM released from leaf and litterfall in *Castanopsis carlesii* forest and *Cunninghamia
lanceolata* plantation KANG Genli, YANG Yusheng, SI Youtao, et al (1946)
- Seasonal dynamics of leaf area index using different methods in the Korean pine plantation
..... WANG Baoqi, LIU Zhili, QI Yujiao, et al (1956)
- Influence of environmental changes on stoichiometric traits of nitrogen and phosphorus for *Larix gmelinii* trees
..... PING Chuan, WANG Chuankuan, et al (1965)
- Soil water in deep layers under different land use patterns on the Loess Tableland ... CHENG Liping, LIU Wenzhao, LI Zhi (1975)
- Water parameters of the branch of *Larrea tridentata* under different soil drought stress
..... ZHANG Xiangning, SUN Xiangyang, WANG Baoping, et al (1984)
- Effects of shading treatments on photosynthetic characteristics of *Juniperus sabina* Ant. seedlings
..... ZHAO Shun, HUANG Qiuxian, LI Yuling, et al (1994)
- Root distribution in typical sites of Lijiang ecotone and their relationship to soil properties
..... LI Qingshan, WANG Dongmei, XIN Zhongbao, et al (2003)
- The survival and above/below ground growth of *Haloxylon ammodendron* seedling
..... TIAN Yuan, TASHPOLAT · Tiyp, LI Yan, et al (2012)
- Effects of simulated acid rain on the physiological and ecological characteristics of *Rhododendron hybridum*
..... TAO Qiaojing, FU Tao, XIANG Xina, et al (2020)
- Karst cave bacterial calcium carbonate precipitation: the Shijiangjun Cave in Guizhou, China
..... JIANG Jianjian, LIU Ziqi, HE Qiufang, et al (2028)
- Migration of the 7th generation of brown planthopper in northeastern Guangxi Zhuang Autonomous Region, and analysis of source
areas QI Huihui, ZHANG Yunhui, JIANG Chunxian, et al (2039)

Population, Community and Ecosystem

- The dynamics and determinants of population size and spatial distribution of Common Cranes wintering in Poyang Lake
..... SHAN Jihong, MA Jianzhang, LI Yankuo, et al (2050)
- Effects of snow pack on wintertime soil nitrogen transformation in two subalpine forests of western Sichuan
..... YIN Rui, XU Zhengfeng, WU Fuzhong, et al (2061)
- Numerical classification, ordination and species diversity along elevation gradients of the forest community in Xiaolinling
..... CHEN Yun, WANG Hailiang, HAN Junwang, et al (2068)
- Phytoplankton community structures revealed by pigment signatures in Norwegian and Greenland Seas in summer 2012
..... WANG Xiaoying, ZHANG Fang, LI Juanying, et al (2076)
- Analysis of differences in insect communities at different altitudes in *Zanthoxylum bungeanum* gardens, Yunnan, China
..... GAO Xin, ZHANG Limin, ZHANG Xiaoming, et al (2085)
- The bacterial community changes after papermaking wastewater treatment with artificial wetland
..... GUO Jianguo, ZHAO Longhao, XU Dan, et al (2095)

- Ecological water requirement estimation of the rump lake in an extreme arid region of East Juyanhai
..... ZHANG Hua, ZHANG Lan, ZHAO Chuanyan (2102)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Spatial distribution patterns of species richness and hotspots of protected plants in Qinling Mountain
..... ZHANG Yinbo, GUO Liulin, WANG Wei, et al (2109)
- Impacts of solar radiation on net ecosystem carbon exchange in a mixed plantation in the Xiaolangdi Area
..... LIU Jia, TONG Xiaojuan, ZHANG Jinsong, et al (2118)
- Carbon density and distribution of *Pinus tabulaeformis* plantation ecosystem in Hilly Loess Plateau
..... YANG Yujiao, CHEN Yunming, CAO Yang (2128)
- Dynamics of carbon storage at different aged *Koelreuteria paniclata* tree in Xiangtan Mn mining wasteland
..... TIAN Dalun, Li Xionghua, LUO Zhaozhui, et al (2137)

Resource and Industrial Ecology

- Contamination status of Pb and Cd and health risk assessment on vegetables in a mining area in southern Hunan
..... WU Yanming, LV Gaoming, ZHOU Hang, on storage at different age (2146)

Urban, Rural and Social Ecology

- Life cycle assessment and environmental & economic benefits research of important building external insulation materials in Beijing ...
..... ZHU Lianbin, KONG Xiangrong, WU Xian (2155)
- Effects of urban imperious surface on the habitat and ecophysiology characteristics of *Ginkgo biloba*
..... SONG Yingshi, LI Feng, WANG Xiaoke, et al (2164)

《生态学报》2014 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

本期责任副主编 杨永兴

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 34 卷 第 8 期 (2014 年 4 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 34 No. 8 (April, 2014)

编 辑 《生态学报》编辑部
地址:北京海淀区双清路 18 号
邮政编码:100085
电话:(010)62941099
www.ecologica.cn
shengtaixuebao@rcees.ac.cn

主 编 王如松

主 管 中国科学技术协会

主 办 中国生态学会
中国科学院生态环境研究中心
地址:北京海淀区双清路 18 号
邮政编码:100085

出 版 科 学 出 版 社
地址:北京东黄城根北街 16 号
邮政编码:100717

印 刷 北京北林印刷厂

发 行 科 学 出 版 社
地址:东黄城根北街 16 号
邮政编码:100717
电话:(010)64034563
E-mail: journal@ cspg. net

订 购 全国各地邮局

国外发行 中国国际图书贸易总公司
地址:北京 399 信箱
邮政编码:100044

广告经营 京海工商广字第 8013 号

许 可 证

Edited by Editorial board of
ACTA ECOLOGICA SINICA
Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
Tel: (010) 62941099
www.ecologica.cn
shengtaixuebao@rcees.ac.cn

Editor-in-chief WANG Rusong

Supervised by China Association for Science and Technology

Sponsored by Ecological Society of China
Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS
Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China

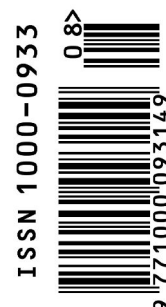
Published by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China

Printed by Beijing Bei Lin Printing House,
Beijing 100083, China

Distributed by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North
Street, Beijing 100717, China
Tel: (010) 64034563
E-mail: journal@ cspg. net

Domestic All Local Post Offices in China

Foreign China International Book Trading
Corporation
Add: P.O.Box 399 Beijing 100044, China



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元