文章编号：1674－5566(2011)05－0712－08

温度和不同氮磷浓度培养的小球藻对透明溞生长和繁殖的影响

徐 怡，胡忠军，刘其根，李家乐

（上海海洋大学 水产与生命学院，上海 201306）

摘 要：研究了5种不同氮、磷浓度（3个氮磷比）对小球藻（*Chlorella vulgaris*）生长和藻体氮、磷含量的影响；并以这些不同氮、磷含量的小球藻在11、17和23 ℃ 3种温度条件下投喂透明溞（*Daphnia hyalina*），研究温度和不同条件培养的小球藻对透明溞生长和繁殖的影响。结果表明：3种氮磷原子比（正常BG-11培养基，N∶P＝76.77∶1；氮磷比为正常培养基的1/5和5倍的培养基）中，氮磷比为正常培养基1/5的小球藻生长最好，且其藻体氮磷比明显低于其它组；氮磷比为正常培养基5倍的小球藻生长速度低于正常培养基组，但其藻体的氮磷比略高于正常培养基组。用这些藻类投喂透明溞，结果表明，在各种培养温度下，投喂低N∶P组小球藻的透明溞净生殖率（R_0）和平均世代周期（T）总体表现为最高（范围分别为36.14～120.83和24.61～35.56 d），投喂中N∶P组小球藻者次之（范围分别为16.29～59.39和20.52～33.59 d），投喂高N∶P组小球藻者最低（范围分别为13.02～38.99和18.99～33.51 d）；然而，透明溞的内禀增长率（r_m）则表现为投喂高氮且高N∶P组小球藻者最高（范围为0.115～0.179），低N∶P组次之（范围为0.105～0.152），而低磷且高N∶P组最低（范围为0.081～0.128）。此外，水体温度对透明溞生长和繁殖也有影响，17 ℃是透明溞生长、繁殖最适合的温度。

研究亮点：本研究为国内首次从水体营养改变所引起的藻类元素组成的改变及其对浮游动物影响的角度出发，开展对水体营养状况、浮游植物营养组成和浮游动物生长繁殖等三者相互关联或影响的研究，可以为浮游生物生态学研究、饵料生物培养提供重要参考，为认识水体浮游生物的演替机制研究提供新的线索。

关键词：小球藻；透明溞；温度；N∶P
中图分类号：S 963.2
文献标志码：A

藻食生物的牧食作用对藻类的种类组成和数量变动产生重要影响；反之，藻类营养组成的改变，也会影响到藻食生物的生长和繁殖、水体生物群落的组成及其优势种的演替。有关浮游动物的季节演替，以往的研究更关注水温等物理因素的直接影响[1-3]或水中营养物（如氮、磷等）[4-5]等化学因素的季节变动对藻类种类组成和数量改变而产生的间接影响。如浮游动物的PEG模型[6]理论就认为冬季水体积累的营养物，使藻类产生春季高峰，接着是夏季相对较低的藻类数量和秋季形成次高峰，并由此产生了浮游动物的次生演替。显然，这种藻类数量变动与浮游动物季节演替之间的关系，并没有涉及到两者相互作用的全部。近几十年来，国外有些学者已经关注到水体营养改变所引起的藻类营养（元素）组成的改变及其对浮游动物的影响。如STERNER等[7]、ELSER等[8]及ANDERSEN和HESSEN[9]。然而国内还未见相关研究。

本研究在实验条件下通过改变培养基中的氮、磷浓度，然后用这几种不同营养条件下培养的藻类投喂从千岛湖分离培养的透明溞，以了解藻类的氮、磷含量或N∶P变化对植食性枝角类种群增长和死亡等影响，为进一步了解浮游动物的季节演替提供更多的证据。

收稿日期：2011-01-20 **修回日期**：2011-04-26
基金项目：国家自然科学基金(31072218)；公益性行业(农业)科研专项(200903028)
作者简介：徐 怡(1985—)，女，硕士研究生，研究方向为水域生态学。E-mail：xubeibei22@163.com
通讯作者：刘其根，E-mail：qgliu@shou.edu.cn

1　材料与方法

1.1　实验设计

为了解不同氮、磷浓度和 N∶P 对藻类生长及藻体氮磷和氮磷比的影响,及以此藻类为食物对浮游动物的影响,本研究以 BG-11 培养基为基础($NaNO_3$ 和 K_2HPO_4 作为氮源和磷源),分别配制成正常的 BG-11 培养基(N、P 原子比,N∶P = 76.77∶1)、氮浓度不变磷浓度是正常培养基 1/5(N/0.2P)和 5 倍(N/5P),和磷浓度不变氮浓度是正常培养基 1/5(0.2N/P)和 5 倍(5N/P)这 5 种培养基(表 1),形成氮或磷限制的不同情况,以观察与标准培养基相比,氮限制和磷限制的培养基培养对小球藻生长和藻细胞氮、磷含量的影响,及以此藻类投喂透明溞后,对其存活、生长和繁殖产生的影响。

表 1　5 个实验组培养基中的氮磷绝对浓度及其原子比和质量比

Tab.1　The absolute concentrations of N and P, the molar and weight N∶P ratios of the 5 experimenting media

实验组		N 浓度/(mg/L)	P 浓度/(mg/L)	N∶P 质量比	N∶P 原子比
高 N∶P	5N/P 组	1 235.294	7.126	173.35∶1	383.85∶1
	N/0.2P 组	247.059	1.425		
正常 N∶P	N/P 组	247.059	7.126	34.67∶1	76.77∶1
低 N∶P	N/5P 组	247.059	35.632	6.93∶1	15.35∶1
	N/0.2P 组	49.412	7.126		

1.2 小球藻生长实验

1.2.1　实验材料

实验用小球藻藻种取自上海海洋大学藻种库,保存在 BG-11 培养基中,培养条件为 26 ℃,光照强度为 2 500 lx,光暗比为 14 h∶10 h。当小球藻密度达到 1×10^6/mL 时作为试验藻种。

取适量对数期的小球藻以 4 000 r/min 的速度离心 15 min,弃上清液,用 15 mg/L 的碳酸氢钠溶液洗涤后离心,重复 3 次,然后将其用无菌水稀释,饥饿培养 2 d。

1.2.2　培养方法

将经过饥饿培养的小球藻分别接种到装有 400 mL 上述 5 种培养液的三角烧瓶中,接种密度为 5×10^4/mL,每组设 3 个平行。然后将这些三角烧瓶放入培养箱进行通气培养,设定温度为 26 ℃,光照强度为 2 500 lx,光暗比为 14 h∶10 h。

当每种培养基的藻细胞个数达到 1×10^6/mL 左右时,开始进行透明溞生长实验,每 2 天吸取 1.5 mL 藻液用来测定小球藻密度,直到各组平均增长值低于 5% 时,停止测定。并吸取藻类生长达到饱和期的藻液,用来测定藻细胞的氮、磷含量。

1.2.3　小球藻细胞密度的测定

小球藻密度用分光光度法测定[10]。取一定量的藻种在显微镜下计数,并按一定的稀释倍数逐级进行稀释,得到相应的藻细胞密度,再将所得到的系列藻液用分光光度计在 680 nm 波长下以 5 种培养基作为空白测定吸光度,得到吸光度 - 密度标准曲线。将每 2 天测定藻液的吸光度代入标准曲线即可得出藻细胞密度。

1.2.4　小球藻细胞氮、磷含量的测定

小球藻细胞氮、磷含量的测定参照 ELSER 和 GEORGE 的方法[11]。用经过马弗炉 450 ℃灼烧 2 h 并经稀 HCl 酸化后的 GF/F 玻璃纤维滤膜抽滤藻液,然后放入 Vario EL Cube 元素分析仪(德国 elementa 公司)中测定氮元素。磷元素的测定用钼酸铵分光光度法(GB 11893—89)。

1.3　透明溞生长实验

1.3.1　实验材料

实验所用的透明溞来自浙江省淳安县千岛湖。在实验室中用经 0.45 μm 微孔滤膜抽滤过的上海海洋大学校园水系湖水(TC = 41.57 mg/L,TN = 11.6 mg/L,TP = 0.17 mg/L)和以小球藻为饵料的方式培养,使其连续孤雌生殖。所有实验用透明溞均来自同一母体。

1.3.2　实验方法

实验共设 5 个食物组和 3 个温度组,分别以 N/P、N/0.2P、N/5P、0.2N/P、5N/P 这 5 种培养基下的小球藻作为透明溞的食物,将这 5 个食物组分别放入 11 ℃、17 ℃和 23 ℃的培养箱中,每组设 10 个平行。用 10 × 18 规格的试管,在管内注入稀释后的藻液 15 mL,每管随机移入 2 个出生 24 h 左右的幼溞,每 2 天更换培养液以保证提供充足的食物,统计死亡的母体个数和新生的幼溞个数,并及时移出幼溞。将各个 17 ℃食物组的新生幼溞(40 个左右)挑出,20 个左右用来测量平均体长,设为 I_0。另外 20 个左右放入 100 mL 烧杯中,注入 100 mL 稀释后的藻液,放入 17 ℃的培养箱中。每天换一次藻液,持续 5 d,再将透明溞取出、再次测量平均体长,设为 I_5。然后计

算17 ℃下各食物组透明溞的5日体长生长率。藻液用经0.45 μm孔径微孔滤膜抽滤的上海海洋大学校园水系湖水稀释,保证每次喂食的小球藻浓度均为5×10^5/mL。

1.3.3 数据处理

根据观察结果编制生命表[12],计算净生殖率(R_0)、平均世代周期(T)、内禀增长率(r_m),公式

$$T = \sum X \cdot l_x \cdot m_x / \sum l_x \cdot m_x \quad (1)$$

$$R_0 = \sum l_x \cdot m_x \quad (2)$$

$$r_m = \ln R_0 / T \quad (3)$$

式中:x为日龄;l_x为x龄的存活率;m_x为x龄的生殖率。

体长生长率用公式[13]

$$k = (I_5 - I_0)/\triangle t \quad (4)$$

式中:k为平均体长生长率(mm/d);I_5为结束实验时个体的平均长度(mm);I_0为开始实验时个体的平均长度(mm);$\triangle t$为开始实验到实验结束的天数(d)。

2 实验结果

2.1 不同氮、磷浓度下小球藻的生长情况

不同氮、磷浓度下小球藻的生长曲线见图1。藻密度的测定是接种6 d后开始的,此时5组的藻类密度都达到了1×10^6/mL以上。从图中可看出,5组小球藻的生长都表现为"S"型曲线。各组的最高藻密度从大到小的排列为:0.2N/P > N/5P > N/P > 5N/P > N/0.2P。

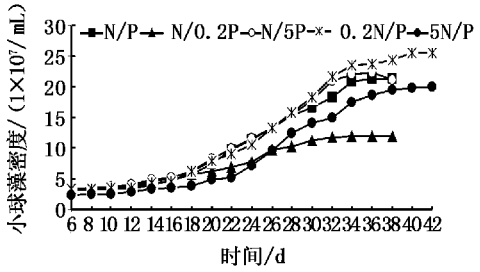

图1 不同氮、磷浓度下小球藻的生长曲线

Fig.1 Growth curve of *Chlorella vulgaris* under different nitrogen and phosphorus concentrations

2.2 不同氮、磷浓度下小球藻细胞的氮、磷含量以及N:P

不同氮、磷浓度下小球藻细胞的氮、磷含量见表2。在5种不同类型的培养基下藻类细胞的氮、磷含量和N:P存在一定差异。藻类N:P(原子比)表现为氮磷比为正常培养基5倍的N/0.2P和5N/P组较高,标准培养基(N/P)组次之,氮磷比为正常培养基1/5的N/5P和0.2N/P组最低。

表2 不同氮、磷浓度下小球藻细胞的氮、磷含量及N:P

Tab.2 Nitrogen and phosphorus contents and N:P ratio of *Chlorella vulgaris* under different nitrogen and phosphorus concentrations

培养基类型	N/%	P/%	N:P (质量比)	N:P (原子比)
N/P	14.84	1.70	8.71	19.28
N/0.2P	11.44	1.29	8.90	19.70
N/5P	12.68	2.16	5.86	12.98
0.2N/P	10.49	1.73	6.06	13.42
5N/P	12.61	1.23	10.23	22.66

2.3 不同温度与不同氮磷含量或比例培养的藻类(藻类食物质地)对透明溞生长的影响

2.3.1 不同温度与藻类食物质地对透明溞存活率的影响

不同温度和食物质地下透明溞的存活率情况见图2~4。

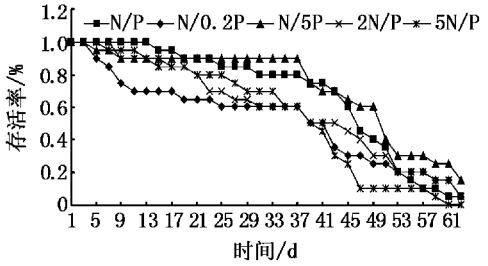

图2 11 ℃,5种食物质地下透明溞的存活率曲线

Fig.2 11 ℃, Survivorship curve of *Daphnia hyalina* fed on 5 different algal qualities

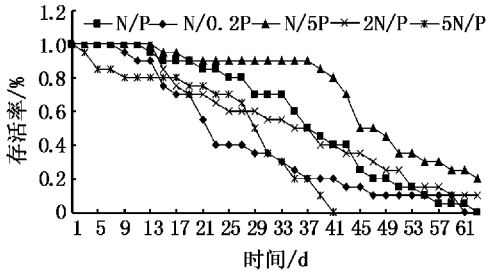

图3 17 ℃,5种食物质地下透明溞的存活率曲线

Fig.3 17 ℃, Survivorship curve of *Daphnia hyalina* fed on 5 different algal qualities

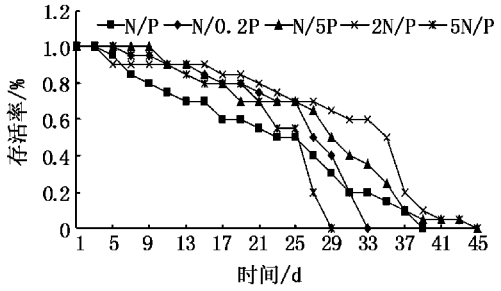

图 4　23 ℃,5 种食物质地下透明溞的存活率曲线

Fig. 4　23 ℃, Survivorship curve of *Daphnia hyalina* fed on 5 different algal qualities

首先是 3 个温度组方面。11 ℃条件下的存活率曲线一开始比较平缓,在 37 d 后下降的趋势才比较明显。17 ℃条件下透明溞的死亡率在时间分布上比较均匀。而 23 ℃条件下,温度对透明溞存活率的影响明显比 11 ℃和 17 ℃条件下要大,实验进行到第 29 天就有一组动物死亡,43 d 以后所有受试动物全部死亡。

其次是 5 个食物组方面。11 ℃条件下 5 个食物组对透明溞存活率的影响较小。17 ℃和 23 ℃条件下 5 个食物组对透明溞存活率影响的差异就相对明显了,N/0.2P 组和 5N/P 组的曲线都下降得很快,且都是最早降到 0。尤其是 5N/P 这一组,存活率的下降和到达 0 点的速度都是各组别中最快的。N/P 组的曲线以均匀的速度下降。N/5P 组的曲线在 17 ℃条件下下降最慢,而0.2 N/P 组的曲线在 23 ℃条件下下降最慢。另外,11 ℃和 17 ℃条件下的 N/5P 与 0.2N/P 组在实验结束(63 d)时都还有个体存活。

2.3.2　不同食物质地下透明溞的体长生长率

17 ℃,5 种食物质地下透明溞的 5 日体长生长率分别为:0.154 mm/d(N/P),0.151 mm/d(N/0.2P),0.165 mm/d(N/5P),0.171 mm/d(0.2N/P),0.164 mm/d(5N/P)。从高到低的排列顺序为:0.2N/P > N/5P > 5N/P > N/P > N/0.2P。经单因素方差分析,N/P 和 N/0.2P 组没有显著差异($P>0.05$),0.2N/P、N/5P 和 5N/P 组没有显著差异($P>0.05$),但是前 2 组和后 3 组之间有极显著差异($P<0.05$)。

2.3.3　不同温度与食物质地下透明溞的生殖率

不同温度和食物质地下透明溞生殖率情况见图 5 ~7。

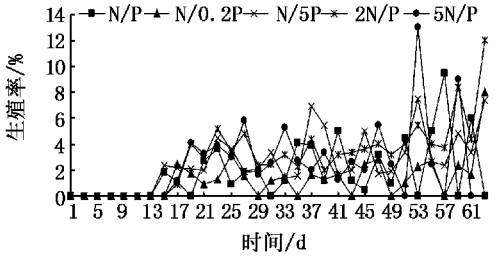

图 5　11 ℃,5 种食物质地下透明溞的生殖率

Fig. 5　11 ℃, Reproduction of *Daphnia hyalina* fed on 5 different algal qualities

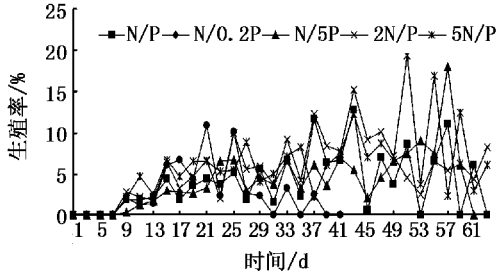

图 6　17 ℃,5 种食物质地下透明溞的生殖率

Fig. 6　17 ℃, Reproduction of *Daphnia hyalina* fed on 5 different algal qualities

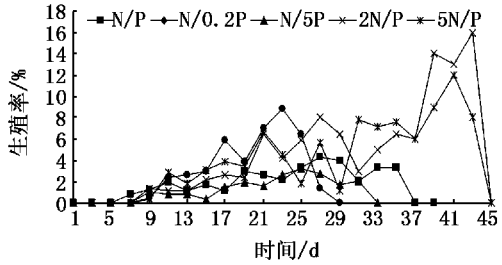

图 7　23 ℃,5 种食物质地下透明溞的生殖率

Fig. 7　23 ℃, Reproduction of *Daphnia hyalina* fed on 5 different algal qualities

在 11 ℃的低温状态下,只有 N/P 组和 N/5P 组的透明溞在第 15 天有幼体产出,其余 3 组都是 17 d 才产出。生殖率大多分布在 3 ~8 之间。因为据观察,低温条件下 1 个母溞可能要经过 4 ~8 d 才可能产出幼体,所以每两天的生殖率平均数相对较小。17 ℃条件下,每个食物组的透明溞都在 9 d 后产出幼体,且生殖率也提高了,大致分布在 5 ~15 周围,并在 0.2N/P 组出现了 19.33 的峰值。23 ℃条件下透明溞产幼最早,其中的 N/P 组在第 7 天就有幼体产出,其余 4 组也在 9 d 均产出幼体,但总体的生殖率不如 17 ℃条件下高,虽然 N/5P 和 0.2N/P 组在后期都出现了较高的

值,但此时透明溞的存活率为0.05~0.10,也就是说只有1~2个个体存活,所产出的幼体个数并不能完全代表平均产雌率。可见,过低或过高的温度都会对透明溞的生殖产生负面影响。

在不同食物质地条件下,透明溞生殖率的差别也较明显。N/0.2P组在3个温度环境中的生殖率都最低,曲线较平缓,很少出现较高的值,且有时会出现生殖率为0的状况,特别是在11 ℃条件下。N/P组的曲线多在其它曲线之间,有时会出现较高的值,但有时也会出现生殖率为0的状况。其余3组都有曲线波动很大的状况。5N/P组的母溞虽然存活的时间不长,但生殖率比较高;有时也会出现生殖率为0,但都发生在后期母溞个体比较少的时候。N/5P组和0.2N/P组的生殖率都比较高,这与存活率的情况相似,说明低N:P的食物不仅能提高透明溞的存活率,还能提高其生殖率。

2.3.4 不同温度与食物质地下透明溞的净生殖率(R_0)、平均世代周期(T)和内禀增长率(r_m)

由表3可见,17 ℃条件下5个食物组的透明溞净生殖率都高于其余2个温度条件下的各个食物组,11 ℃条件下次之,23 ℃条件下最低(除0.2N/P组)。透明溞的平均世代周期随温度升高而缩短,而其内禀增长率却随温度的升高而升高。

表3 不同温度与食物质地下透明溞的生活史特征参数
Tab.3 Life history's parameters of *Daphnia hyalina* fed on different quality of food at different temperatures.

组别	R_0	T	r_m
11℃ N/P	32.23	33.59	0.103
11℃ N/0.2P	14.96	33.51	0.081
11℃ N/5P	50.85	35.56	0.110
11℃ 0.2N/P	39.32	35.11	0.105
11℃ 5N/P	32.80	30.25	0.115
17℃ N/P	59.39	29.74	0.137
17℃ N/0.2P	33.19	30.40	0.115
17℃ N/5P	120.83	33.74	0.142
17℃ 0.2N/P	80.99	30.73	0.143
17℃ 5N/P	38.39	20.41	0.179
23℃ N/P	16.29	20.52	0.136
23℃ N/0.2P	13.02	20.01	0.128
23℃ N/5P	36.14	24.61	0.146
23℃ 0.2N/P	44.07	24.92	0.152
23℃ 5N/P	28.49	18.99	0.176

从食物组情况来看,5N/P组虽然在2个较高温度环境中的平均世代周期很短,但内禀增长率却都是最高的。N/5P和0.2N/P组无论是R_0、T还是r_m都维持在一个相对较高的水平。而N/0.2P的几个生活史特征参数都是最低的。

种群内禀增长率反映了种群的增长潜能。当水体氮和磷的浓度发生变化时,N:P也随之发生改变,从而导致藻细胞的N:P发生变化,进而可能对透明溞种群产生影响,提高或降低其种群增长潜能。

3 讨论

3.1 不同氮、磷浓度对小球藻生长和藻细胞的氮、磷含量以及N:P的影响

本研究表明,N:P比标准培养基低5倍的2组培养基(即N/5P和0.2N/P)培养的小球藻,其生长效果最佳,可以达到的最高藻密度超过标准培养基的这一组;而这2组培养基的氮、磷原子比都为15.35:1,说明小球藻最适合的N:P约为15.35:1。这一结果与易文利等研究氮磷比对铜绿微囊藻生长影响的结果一致,他们的研究发现,N:P=16:1的条件下,铜绿微囊藻的生长速度最快[14]。刘东艳等在研究不同氮磷比对中肋骨条藻生长特性的影响时也发现,在N:P=16:1的状态下,中肋骨条藻生长速度最快,细胞数量最高[15]。这些结果都符合REDFIELD关于藻类对营养盐吸收比值的解释,即当营养盐总水平足以满足浮游植物生长时,浮游植物的氮磷吸收比例基本上是遵循N:P=16:1[16]。在N:P接近16:1时,藻类既不受氮限制也不受磷限制,因而生长较好。而N:P高于正常培养基的N/0.2P组和5N/P组,小球藻的生长则不如标准培养基组(N/P)和低N:P组,说明氮、磷比例太高不适合小球藻生长。另外,不同N:P的培养基也会影响小球藻细胞对氮、磷的吸收,且具有一定的规律。N:P高的培养基,小球藻细胞的N:P也高(高于REDFIELD比值);N:P低的培养基,藻细胞的N:P也低(低于REDFIELD比值);正常培养基的藻细胞N:P在两者之间,但与高N:P组更接近。

本研究还显示,N:P相同但绝对浓度不同时,低绝对氮浓度组(0.2N/P)的最高藻密度大于高绝对浓度组(N/5P),而低绝对磷浓度组(N/0.2P)的最高藻密度又小于高绝对磷浓度组(5N/

P),这说明藻类生长是由氮、磷的绝对浓度和N:P这两个因素一起决定的,当 N:P 保持不变时,并不是绝对浓度越高,藻类的生长越好。另外,从藻细胞对营养盐吸收的情况看,藻细胞的氮、磷含量也并非与培养基的营养盐绝对浓度成正比。5N/P 组的藻细胞氮含量并不是最高的,N/0.2P 组的藻细胞磷含量也不是所有组中最低的。所以,培养基的营养盐绝对浓度也是影响藻类对氮、磷元素吸收的重要因素。每种藻类都有其最适合的 N:P 和氮、磷绝对浓度,只有合理地控制这两个因素,才能使藻类更有效地吸收营养盐,从而更快更好地生长。

3.2　温度对透明溞生长与繁殖的影响

根据千岛湖湖水全年的平均温度在 11 ~23 ℃这一情况,本研究设定了 11 ℃、17 ℃、23 ℃ 3 个温度组,分别代表冬季、春秋季和夏季的水环境温度,探究季节变化对透明溞生长、繁殖的影响。

本研究显示,温度对透明溞生长与繁殖的影响明显。11 ℃的低温环境能使透明溞提高存活率,最高寿命达到 63 d 以上;但不利于透明溞的繁殖,不但使其第一次产雌时间延迟在 15 d 以后,而且使其降低了生殖率。23 ℃的高温环境不利于透明溞的生存,在实验进行到第 29 天时就有一个食物组的个体全部死亡,进行到第 43 天时所有食物组的母溞全部死亡;但却使透明溞的第一次产雌时间比低温组提前了 8 d,且其生殖率也提高了。在 17 ℃这个中间温度环境中,透明溞的存活率和生殖率达到了平衡,是本次实验 3 个温度组中最适合透明溞生长与繁殖的。另外,从温度对透明溞几个生活史特征参数的影响可得,温度的升高使透明溞缩短寿命,却提高了内禀增长率,有助于提高其世代更新的速度和种群增长的潜能。

黄祥飞在研究温度对透明溞和隆线溞一亚种发育及生长的影响时表明,在 15 ~30 ℃温度范围内,透明溞种群的内禀增长率随温度升高而增加,但其产卵率以 20 ℃为最高[17]。本实验结果显示,透明溞种群的内禀增长率在 23 ℃条件下最高,17 ℃次之,11 ℃最低,其规律与上述研究一致。而本次实验结果显示,透明溞的生殖率在 17 ℃条件下最高。由于我们只设了 3 个温度组,还不足以确定最适合透明溞繁殖的具体温度点,但可以肯定的是,在 17 ℃周围必定有一个最适合其繁殖的温度,这也印证了上述作者的研究结果,同时也表明其繁殖高峰期在春季。

温度对溞属平均寿命的影响在国外也有报道:INGLE 等报道了 25 ℃条件下长刺溞的平均寿命为 29.9 ~41.4 d[18]。BUIKEMA 让蚤状溞在 21 ℃条件下生存,发现了一个低的平均寿命,为 29.9 d[19]。VIJVERBERG[20] 研究食物质量和数量对透明溞生长、生殖率和寿命的影响时,将温度设为 20 ℃,投喂湖水中的自然藻类和自然藻类与人工培养的栅藻的混合物,结果透明溞的平均寿命可达 43.4 ~64.4 d,有栅藻混合的食物组平均每 2 天约产出 5 ~9 个幼体。其平均寿命和生殖率均高于本实验与之温度相近的 17 ℃组和 23 ℃组。原因可能有以下 3 点:(1)透明溞来源于不同的地方,其生长、繁殖能力会有所不同;(2)稀释藻液用的水来自不同湖泊,透明溞生存环境的改变也可能导致其生活史特征发生变化;(3)不同的食物类型可影响溞属的寿命[21]。

3.3　不同营养条件下培养的藻类对透明溞种群增长和死亡的影响

取 5 个食物组透明溞的生活史特征参数,并将在 3 个不同温度条件下的参数逐项平均,可得净增殖率的排序为:N/5P > 0.2N/P > N/P > 5N/P > N/0.2P,平均世代周期的排序为:N/5P > 0.2N/P > N/P > N/0.2P > 5N/P,内禀增长率的排序为:5N/P > 0.2N/P > N/5P > N/P > N/0.2P。5N/P 组透明溞的生活史特征参数大致表现净增殖率和平均世代周期低、内禀增长率最高。说明高氮且高 N:P 的小球藻不利于透明溞的存活,但对其生殖率的影响是正面的。高的内禀增长率也能反映出这种食物质地下透明溞种群较高的增长潜能。N/5P 和 0.2N/P 组透明溞的各项参数都高于 N/P,这与小球藻生长的情况很相似,说明 N:P 接近 16:1 的培养基不但适合小球藻的生长,而且以其作为食物对透明溞的生长、繁殖比较有利,有助于延长透明溞的寿命和提高其种群增长潜能。N/0.2P 组透明溞的各项参数最低,该组的藻类密度也为各组最低。说明低磷且高 N:P 的培养基不能使小球藻较好的吸收营养盐,以致种群增长缓慢,最高藻密度较低。而以其为食物投喂透明溞时,食物质地相对较低,对透明溞的生长、繁殖等产生负面影响。

食物的质量与藻细胞体内的生物化学营养元素组成有关,而且不是由某个单一成分的多少来决定的,而是由多个成分的比例决定。OLSEN等指出,当食物的C:P高且P含量低时,P可以作为溞属生长的限制性元素[22]。本次实验结果也显示,当食物的N:P高而且P含量低时,透明溞的生长、繁殖状况都不好。STERNER指出,食草动物能通过几种方式来对低质量的食物做出响应,其中一种响应就是同化效率不如高质量食物组[7]。本实验在17 ℃条件下测定了透明溞的5日体长生长率。发现0.2N/P、N/5P、5N/P这3组透明溞的体长生长率总体高于N/P和N/0.2P组,且有显著差异。结合上述有关透明溞的存活率、生殖率和各项生活特征史参数,证明对于透明溞的生长与繁殖,低氮且低N:P和高磷且低N:P或者高氮且高N:P藻类的质量要明显高于中N:P或低磷且高N:P藻类。

参考文献:

[1] YOSHIDA T, KAGAMI M, GURUNG T B. Seasonal succession of zooplankton in the north basin of Lake Biwa[J]. Aquatic Ecology, 2001, 35(1):19-29.

[2] CAROLY N W, BURNS, MITCHELL S F. Seasonal succession and vertical distribution of zooplankton in Lake Hayes and Lake Johnson [J]. New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research, 1980, 14(2): 189-204.

[3] 郭沛涌, 沈焕庭, 刘阿成, 等. 长江河口中小型浮游动物数量分布, 变动及主要影响因素[J]. 生态学报, 2008, 28(8): 3517-3526.

[4] OLIVA M G, LUGO A, ALCOCER J, et al. Phytoplankton dynamics in a deep, tropical, hyposaline lake [J]. Hydrobiologia, 2001, 466(3): 299-306.

[5] 孙凌, 金相灿, 钟远, 等. 不同氮磷比条件下浮游藻类群落变化[J]. 应用生态学报, 2006, 17(7): 1218-1223.

[6] SOMMER U, GLIVICZ Z M, LAMPERT W. The PEG-model of seasonal succession of planktonic events in fresh waters [J]. Archiv fur Hydrobiologie, 1986, 106(4): 433-471.

[7] STERNER R W, HAGEMEIER D D, SMITH W L, et al. Phytoplankton nutrient limitation and food quality for Daphnia [J]. Limnology and Oceanography, 1993, 38(4): 857-871.

[8] ELSER J J, HAYAKAWA K, URABE J. Nutrient Limitation Reduces Food Quality for Zooplankton: Daphnia Response to Seston Phosphorus Enrichment [J]. Ecology, 2001, 82(3): 898-903.

[9] ANDERSEN T, HESSEN D O. Carbon, nitrogen, and phosphorus content of freshwater zooplankton [J]. Limnology and Oceanography, 1991, 36(4): 807-814.

[10] 吕旭阳, 张雯, 杨阳, 等. 分光光度法测定小球藻数量的方法研究[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(23): 11104-11105.

[11] ELSER J J, GEORGE N B. The stoichiometry of N and P in the pelagic zone of Castle Lake, California [J]. Journal of Plankton Research, 1993, 15(8): 977-992.

[12] 孙儒泳. 动物生态学原理[M]. 北京: 北京师范大学出版社, 1992.

[13] 林娴, 韩博平. 富营养化水体中自然食物对透明溞(*Daphnia hyalina*)生长与繁殖影响的初步实验[J]. 生态科学, 2006, 25(2): 116-12.

[14] 易文利, 王国栋, 刘选卫, 等. 氮磷比例对铜绿微囊藻生长及部分生化组成的影响[J]. 西北农林科技大学学报, 2005, 33(6): 151-154.

[15] 刘东艳, 孙军, 陈宗涛, 等. 不同氮磷比对中肋骨条藻生长特性的影响[J]. 海洋湖沼通报, 2002, 54(2): 39-45.

[16] REDFIELD A C. The biological control of chemical factors in the environment [J]. American Scientist, 1958, 46(3): 205-222.

[17] 黄祥飞. 温度对透明溞和隆线溞一亚种发育及生长的影响[J]. 水生生物学集刊, 1984, 8(2):207-223.

[18] INGLE L, WOOD T R, BANTA A M. A study of longevity, growth, reproduction and heart rate in *Daphnia longispina* as influenced by limitations in quantity of food [J]. Journal of Experimental Zoology, 1937, 76(2): 325-352.

[19] BUIKEMA A J. Some effects of light on the growth, molting, reproduction and survival of the cladoceran, *Daphnia pulex* [J]. Hydrobiologia, 1973, 41 (3): 391-418.

[20] VIJVERBERG J. The effect of food quantity and quality on the growth, birth-rate and longevity of *Daphnia hyalina* leyding [J]. Ydrobiologia Vol, 1976, 51 (2): 99-108.

[21] 史文, 刘其根, 吴晶, 等. 不同藻类对大型溞存活和生殖的影响[J]. 生态学杂志, 2009, 28(6):1128-1133.

[22] OLSEN Y, JENSEN A, REINERTSEN H. Dependence of the rate of release of phosphorus by zooplankton on the P : C ratio in the food supply, as calculated by a recycling model [J]. Limnology and Oceanography, 1986, 31(1): 34-44.

The influence of temperature and *Chlorella vulgaris* cultivated under different nitrogen and phosphorus concentrations on the growth and reproduction of *Daphnia hyaline*

XU Yi, HU Zhong-jun, LIU Qi-gen, LI Jia-le
(*College of Fisheries and Life Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai* 201306, *China*)

Abstract: *Chlorella vulgaris* was cultivated in nutrient media that contained different concentrations of nitrogen and phosphorus in order to investigate the influence of concentrations of nitrogen and phosphorus or their ratio on algal growth. Meanwhile, grazing experiments of *Daphnia hyalina* were conducted at different temperatures (11, 17, 23 ℃), using the cultivated *C. vulgaris* as food to study the impact of temperature and food quality on the growth and reproduction of *D. hyalina*. Experimental results indicated that of the three N: P atomic ratios (normal BG-11 medium, N: P = 76.77: 1; 1/5-fold and 5-fold N: P ratios in normal medium), 1/5-fold N: P normal ratio offered the best conditions for *C. vulgaris* growth with the lowest N: P ratio in *C. vulgaris* cells than other conditions. *C. vulgaris* cultivated under 5-fold N: P normal ratio has a little higher N: P ratio of the algal body and gave *C. vulgaris* a lower growth rate than the normal medium group. We further fed *D. hyalina* with the different quality of *C. vulgaris*. Results revealed that, regardless of the temperature, the net reproductive rate (R_0) and generation time (T) of *D. hyalina* showed the highest values in low N: P group (36.14 – 120.83, 24.61 – 35.56 d), followed by the middle N: P group (16.29 – 59.39, 20.52 – 33.59 d), and the high N: P group (13.02 – 38.99, 18.99 – 33.51 d). The intrinsic rate of increase (rm) of *D. hyalina* showed the highest values in high N and high N: P group (0.115 – 0.179), followed by the low N: P group (0.105 – 0.152), and the low P and high N: P group (0.081 – 0.128). Besides, water temperature was one of the factors affecting the growth and reproduction of *D. hyalina*. 17 ℃ was the optimum temperature for the growth and reproduction of *D. hyalina*.

Key words: *Chlorella vulgaris*; *Daphnia hyalina*; temperature; N: P