

不同光照周期对刺参摄食节律和消化生理的影响

孙佳敏¹, 王芳¹, 张立斌², 林承刚², 杨红生², 阚仁涛³

(1. 中国海洋大学 教育部海水养殖重点实验室, 山东 青岛 266003; 2. 中国科学院 海洋研究所 海洋生态与环境科学重点实验室, 山东 青岛 266071; 3. 山东蓝色海洋科技股份有限公司, 山东 莱州 261413)

摘要: 在实验室条件下, 研究了全光照(24L:0D)、半光照半黑暗(12L:12D)、全黑暗(0L:24D)3种光照周期下刺参(*Apostichopus japonicus*)的摄食节律、摄食率以及3种消化酶(脂肪酶、淀粉酶、胰蛋白酶)活力的昼夜变化规律。结果显示: (1)在全光照条件下, 刺参极少活动, 24 h 内的摄食比例较低(6%~10%); 在半光照半黑暗条件下, 刺参光照阶段运动不活跃, 摄食比例较低(0~10%), 黑暗阶段运动极其活跃, 摄食比例较高; 在全黑暗条件下, 刺参一直处于较活跃状态, 24 h 内的摄食比例都较高。3种光照条件下, 刺参的摄食高峰都出现在 00:00~02:00, 且刺参夜晚的摄食比例显著高于白天($P<0.05$); (2)刺参的日摄食率从全光照、半光照半黑暗到全黑暗依次增加, 3种光照周期条件下刺参夜晚的摄食率极显著高于白天的摄食率($P<0.01$); (3)3种光照周期下, 刺参3种消化酶活力的最大值都出现在22:00~02:00, 消化酶活力的最大值比摄食高峰早0~4 h。研究结果表明, 光照对刺参的摄食节律和消化酶活力昼夜变化都有显著影响, 刺参具有提前分泌消化酶为即将到来的摄食做好准备的调节机制。

关键词: 刺参(*Apostichopus japonicus*); 光照周期; 摄食节律; 摄食率; 消化酶活力

中图分类号: 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2015)05-0001-08

doi: 10.11759/hyhx20141217001

光照是水生动物生存环境中一个重要的生态因子, 它有多方面的生态作用, 直接或间接地影响着动物的摄食、生长、存活和繁殖^[1]。研究发现, 动物随光照周期的变化而形成的昼夜摄食节律, 是为了充分有效地利用食物资源而进化发展的一种生理节律^[2]。目前国内外关于水生动物摄食节律的研究主要集中在鱼类^[3-7]和虾类^[8-9]。另有研究发现, 光照通过影响水生动物消化酶活力的昼夜变化来影响其对食物的消化吸收, 最终影响水生动物的生长发育^[10-12]。

刺参(*Apostichopus japonicus*)隶属棘皮动物门, 海参纲, 主要分布于中国北部, 俄罗斯东部, 日本和韩国, 由于其具有较高的经济价值, 近年来已成为许多亚洲国家重要的海水养殖品种^[13]。我国刺参的传统养殖方式主要包括池塘养殖、围堰养殖、浅海底播养殖, 这些养殖方式不需要人工投喂饲料。工厂化养殖刺参具有环境可控、养殖周期短、病害爆发少、养殖经济效益高等优点^[14], 而如何在工厂化养殖生产中, 设定合理的光照条件, 采用合理的投喂策略成为人们关注的问题。本文通过高清红外摄像机观察并研究了全光照(24L:0D)、半光照半黑暗(12L:12D)和全黑暗(0L:24D)3种光照周期下刺参的摄食节律的变化, 同时分析了3种光照周期下刺参3种消

化酶(脂肪酶、淀粉酶、胰蛋白酶)活力的昼夜变化规律, 以期对刺参工厂化养殖管理中设定合理的光照周期, 优化其投喂策略提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料的来源与暂养

实验于2014年5月进行。刺参购于青岛市田横苗种厂, 在室内玻璃钢水槽中暂养两周。暂养期间使用的海水是砂滤海水, 水温 16℃, 盐度 30~32, pH 7.8~8.2。暂养期间连续充气, 光照采用自然光照, 光照周期为 14L:10D(L代表光照, D代表黑暗), 日换水量 1/3~1/2, 所换海水均提前曝气 1 d。每天定时(08:00)投喂自制的饲料(饲料由 40%的马尾藻粉和 60%的干海泥混合制成, 其中粗蛋白含量为 3.49%±0.16%, 粗

收稿日期: 2014-12-17; 修回日期: 2015-02-05

基金项目: 国家科技支撑计划(2011BAD13B02); 海洋公益性行业科研专项(201305043、201205023); 国家自然科学基金委员会-山东省人民政府联合资助海洋科学研究中心项目(U1406403)

作者简介: 孙佳敏(1989-), 男, 河南郑州人, 硕士研究生, 研究方向为刺参摄食生物学, 电话: 18254236557, E-mail: sunjiamin8998@163.com; 张立斌, 通信作者, 副研究员, 研究方向: 养殖生态学, 电话: 0532-82896096, E-mail: zhanglibin@qdio.ac.cn

脂肪含量为 $0.58\% \pm 0.01\%$, 灰分含量为 $78.25\% \pm 0.76\%$ 。

暂养结束后, 挑选体态伸展, 身体健康的个体作为实验用的刺参, 实验刺参的平均体长为 $(5.0 \pm 0.8)\text{cm}$, 平均湿质量为 $(20.04 \pm 0.21)\text{g}$ 。

1.2 实验设计与方法

1.2.1 光照条件设计

本实验设置 3 种光照周期处理: 全光照(24L : 0D), 半光照半黑暗(12L : 12D)和全黑暗(0L : 24D), 其中半光照半黑暗条件下光照时间为 08:00~20:00。光源为水下 LED 灯管, 通过调光器调节光照强度为 300 lx(由上海学联仪器厂生产的 JD-1A 水下照度计测定)。本实验将 08:00~20:00 定义为“白天”, 20:00~08:00 定义为“夜晚”。

1.2.2 摄食节律观察实验

在 4 个水族箱($60\text{cm} \times 60\text{cm} \times 50\text{cm}$)中分别放入 10 头刺参, 每天早上 08:00 换水 1/2(所换海水与暂养用海水一致), 并投喂稍过量的饲料。刺参在实验条件下适应 3~4 d 后, 开始 3 种光照周期下刺参摄食活动的观察, 连续观察 4 d, 3 种光照周期实验依次进行。红外摄像机(海康威视, DS-2CC11A2P-IR3)安装于每个水族箱上方, 其能够在完全黑暗的条件下利用自身红外系统观察到刺参的摄食活动, 观察记录的视频数据存储在网络硬盘录像机中用于后期的分析(图 1)^[15]。根据视频数据, 并通过刺参在玻璃缸中的位置以及食物的减少来判断其是否摄食。每半小时记录一次摄食刺参的个数, 通过每个时段摄食比例(摄食个体数占总个体数的百分比)^[16]统计分析刺参的摄食节律。为了更清楚地观察刺参的摄食活动, 观察阶段未进行充氧, 而是采取换水时使用经过充分曝气的海水的方式。实验过程中检测水中溶氧浓度始终维持在 4.5mg/L 以上。

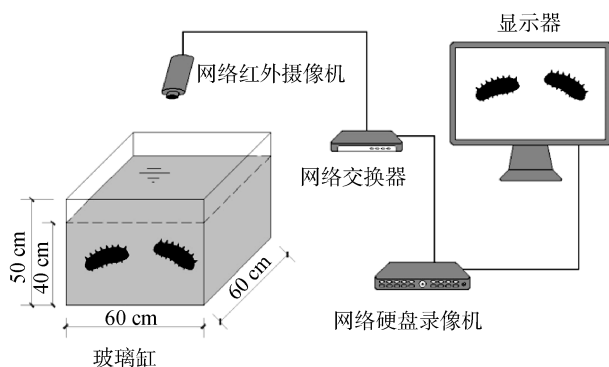


图 1 观察刺参摄食行为装置图

Fig.1 Diagram of the experimental setup for observation of *A. japonicus* feeding behavior

1.2.3 摄食率测定实验

在 4 个玻璃缸($45\text{cm} \times 35\text{cm} \times 30\text{cm}$)中分别放入 6 头刺参, 在实验条件下适应 3~4 d 后开始实验。每天 08:00 和 20:00 各投喂一次自制的饲料(同暂养), 每次投喂前分别将残饵和粪便通过虹吸法收集到塑料杯中, 连续收集 4 d。白天和夜晚的残饵粪便分开收集, 分别用于测定白天和夜晚刺参的摄食率, 3 组光照周期实验依次进行。收集的残饵粪便使用淡水洗去表层的盐分之后, 放入 50 mL 烧杯在烘箱中 60°C 烘至恒质量。白天和夜晚的摄食率按照 Maxwell 等^[17]的方法计算如下:

$$\text{昼/夜摄食率 } IR = ((W_o - W_u) / W_{sc}) / t$$

W_o , 投喂饵料的干质量(mg); W_u , 剩余饵料的干质量(mg); W_{sc} , 每个玻璃缸中刺参的湿质量(g); t , 时间 (h), 每个光照周期条件下刺参的日摄食率按照下面的公式计算:

$$\text{日摄食率 } IR = (IR_{\text{白天}} + IR_{\text{夜晚}}) / 2$$

1.2.4 消化酶活力昼夜变化节律实验

每组光照周期实验分别取同一批次 96 头刺参, 置于 16 个玻璃缸($45\text{cm} \times 35\text{cm} \times 30\text{cm}$)中。经过不同的光照条件下蓄养 10 d 后, 24 h 内每隔 2 h 随机从 8 个缸中各取 1 头(共 8 头)刺参的肠道。所取样品用 0.84% 的冰冷生理盐水将肠道内容物冲洗净后, 每两头刺参的肠道样品放入一个 2 mL 的离心管后放入液氮中, 后转入超低温冰箱中待测。为了消除刺参饥饿程度对消化酶活性的影响, 每天 08:00 定时投喂稍过量的饲料。

肠道匀浆液的制备: 准确称取组织质量, 按质量体积比加入 9 倍的生理盐水制成 10% 的组织匀浆, 2 500 r/min, 离心 10 min, 取上清组织匀浆待测。脂肪酶、淀粉酶和胰蛋白酶活力均采用南京建成生物工程研究所的试剂盒进行测定, 具体测定方法按试剂盒的说明进行。

脂肪酶酶活单位定义: 在 37°C 条件下, 每克组织蛋白在本反应体系中与底物反应 1 min, 每消耗 $1\ \mu\text{mol}$ 底物为一个酶活力单位。单位为 U/g protein。

淀粉酶酶活单位定义: 组织中每毫克蛋白在 37°C 与底物作用 30 min, 水解 10 mg 淀粉定义为 1 个淀粉酶活力单位。单位为 U/mg。

胰蛋白酶酶活单位定义: 在 pH 8.0, 37°C 条件下, 每毫克蛋白中含有的胰蛋白酶每分钟使吸光度变化 0.003 即为一个酶活力单位。单位为 U/mg。

1.3 数据分析

数据以平均值 \pm 标准误 (mean \pm SE) 表示, 数据

处理采用 SPSS19.0 统计软件分析, 采用 T 检验比较白天和夜晚的摄食比例、摄食率以及 3 种消化酶活力的差异, 采用单因素方差分析(One-Way ANOVA)及 Duncan 多重检验比较不同时间点的摄食比例、消化酶活力以及不同光照周期下的摄食率的差异, 以 $P < 0.05$ 作为差异显著水平, $P < 0.01$ 作为差异极显著水平。

2 结果

2.1 三种光照周期下刺参的摄食节律

在全光照条件下, 刺参极少活动, 大多数贴在玻璃缸壁上保持静止状态。在全光照条件下, 刺参的摄食比例较低, 白天摄食活动处于一个相对稳定的状态, 从 20:00 开始刺参摄食比例开始增大, 到 00:00 和 02:00 之间达到峰值 13%, 随后下降。24 h 内的多数时间段摄食比例在 6%~10%(图 2A)。刺参在夜晚的平均摄食比例极显著高于白天的平均摄食比例($P < 0.01$, 图 3)。

在半光照半黑暗条件下, 光照阶段刺参运动不活跃, 黑暗阶段运动极其活跃。从光照阶段转入黑暗阶段(20:00), 刺参立即从不活跃状态变为活跃状态, 沿着缸壁或底部运动, 有的寻觅到食物开始摄食, 有的则一直或者间断地运动; 从黑暗阶段转入光照阶段(08:00), 刺参立刻从玻璃缸底部向角落或缸壁运动, 贴在壁上不再运动或很少运动。刺参在光照阶段摄食比例较低 (0~10%)。从 20:00 开始摄食活动开始活跃, 摄食比例迅速增加, 在 00:00~02:00 时段达到摄食高峰, 最大摄食比例为 41%。从黑暗阶段转到光照阶段, 摄食比例迅速下降到几乎为零(图 2B)。半光照半黑暗条件下, 刺参夜晚的平均摄食比例极显著高于白天的摄食比例($P < 0.01$, 图 3)。

在全黑暗条件下, 刺参一直处于活跃状态, 但整体夜晚较白天更为活跃。白天阶段刺参的摄食比例波动较小, 从 18:00 开始摄食比例开始逐渐增加, 到 00:00~02:00 达到摄食高峰 29%(图 2C)。全黑暗条件下, 刺参夜晚的平均摄食比例显著高于白天 ($P < 0.05$, 图 3)。

2.2 三种光照周期下刺参的摄食率

光照周期对刺参的摄食率影响显著(图 4A, $P < 0.05$), 刺参的摄食率从全光照, 半光照半黑暗到全黑暗依次增加, 分别为 (2.38 ± 0.12) mg/(g·h), (3.53 ± 0.13) mg/(g·h) 和 (4.89 ± 0.18) mg/(g·h)(图 4A)。

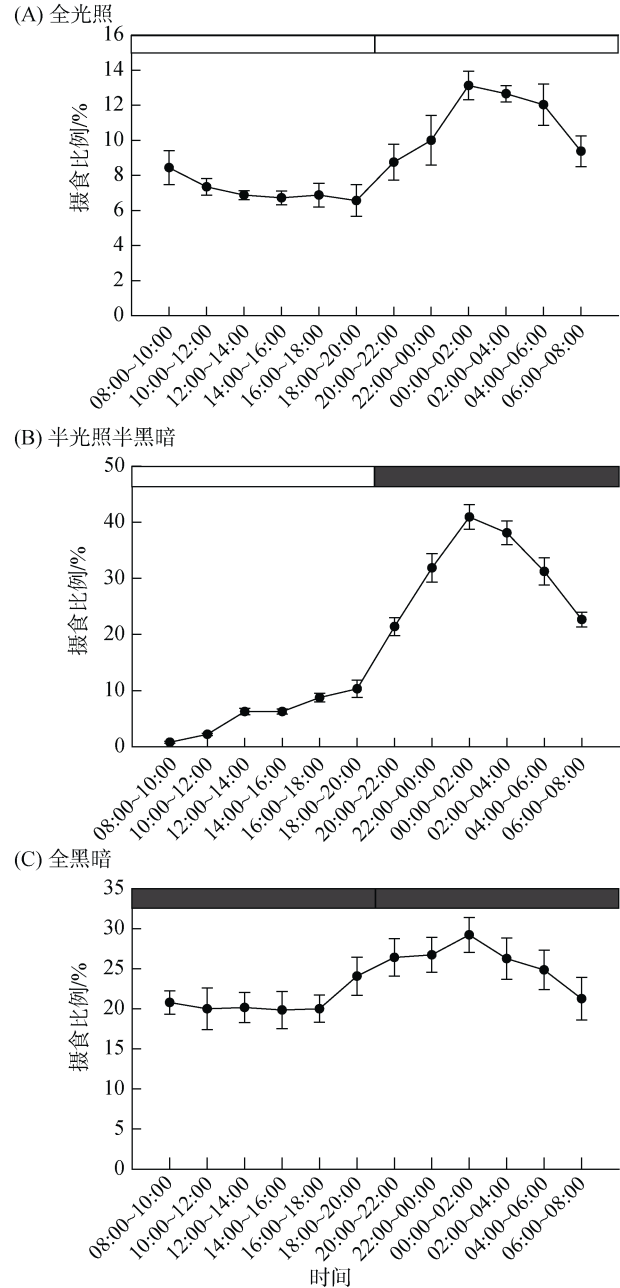


图 2 不同光照周期下刺参摄食比例的昼夜变化

Fig.2 Diurnal changes of feeding proportion of *A. japonicus* under different photoperiods

3种光照周期下刺参夜晚的摄食率极显著高于白天的摄食率(图4B, $P < 0.01$)。

2.3 三种光照周期下刺参消化酶活力的昼夜变化

在全光照条件下, 脂肪酶活力从 10:00 开始逐渐升高, 到 00:00 达到峰值 (10.61 ± 0.61) U/g, 然后又开始下降。半光照半黑暗条件下, 刺参脂肪酶活力的最低值出现在 14:00, 最高值出现在 00:00。全黑暗

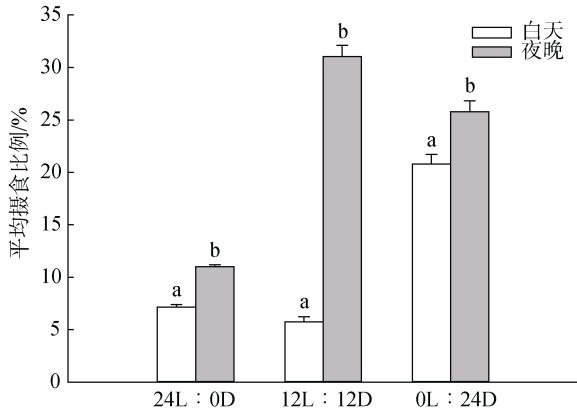


图3 不同光照周期下刺参白天和夜晚的平均摄食比例
Fig.3 Mean day and night feeding proportions of *A. japonicus* under different photoperiods

同一组别标有不同字母表示差异显著($P<0.05$)
Different letters within each treatment represent significant differences ($P<0.05$)

条件下, 刺参脂肪酶活力变化规律性不明显, 但白天酶活相对于其他两组较高, 酶活最高值出现在 22:00(图 5A)。

在全光照条件下, 刺参淀粉酶的活力从 08:00 开始逐渐下降, 到 16:00 达到最低值(0.40 ± 0.07)U/mg, 然后又开始升高, 到 22:00 达到酶活最高值($1.07\pm$

0.12)U/mg。半光照半黑暗条件下, 刺参淀粉酶活力的变化规律性不明显, 最高值出现在 02:00, 最低值出现在 18:00。全黑暗条件下, 刺参淀粉酶活力 24 h 内变化不显著($P>0.05$), 最高值出现在 22:00 (图 5B)。

在全光照条件下, 刺参胰蛋白酶不同时间段的活力差异不显著($P>0.05$), 在 22:00 出现最高值(61.75 ± 6.16)U/mg, 最低值(39.23 ± 4.07)U/mg 出现在 14:00。半光照半黑暗条件下, 刺参胰蛋白酶活力从 08:00 到 20:00 波动不显著($P>0.05$)从 20:00 开始逐渐升高到 00:00 达到最高值(85.01 ± 6.04)U/mg。全黑暗条件下, 刺参胰蛋白酶从 08:00 到 20:00 波动也不显著($P>0.05$), 最高值出现在 02:00(图 5C)。

从表 1 可以看出, 脂肪酶活力昼夜差异在全光照条件下显著($P<0.05$), 在半光照半黑暗和全黑暗条件下极显著($P<0.01$)。淀粉酶活力昼夜差异在全光照条件下显著($P<0.05$), 在半光照半黑暗条件下极显著($P<0.01$), 而在全黑暗条件下不显著($P>0.05$)。胰蛋白酶活力昼夜差异在全光照条件下不显著($P>0.05$), 在半光照半黑暗条件下差异极显著($P<0.01$), 在全黑暗条件下显著($P<0.05$)。

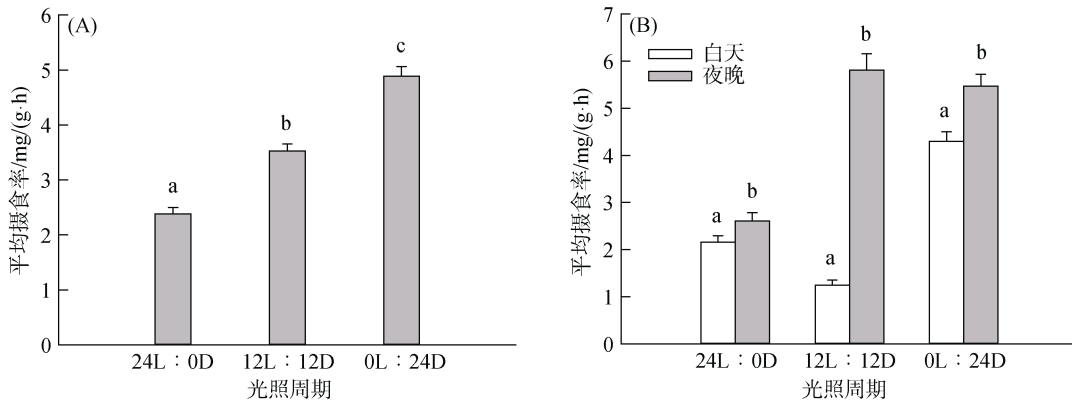


图4 不同光照周期下刺参的日摄食率和昼夜摄食率

Fig.4 Day ingestion rate and day and night ingestion rates of *A. japonicus* under different photoperiods

A.不同光照周期下刺参的日摄食率; B.不同光照周期下刺参的昼夜摄食率;同一组别标有不同字母表示差异显著($P<0.05$)
A. Ingestion rate of *A. japonicus* under different photoperiods; B. Day and night ingestion rates of *A. japonicus* under different photoperiods;
Different letters within each treatment represent significant differences ($P<0.05$)

表1 不同光照周期下刺参3种消化酶的昼夜平均活力

Tab.1 Mean day and night activities of three digestive enzymes of *A. japonicus* under different photoperiods

	脂肪酶活力(U/g)			淀粉酶活力(U/mg)			胰蛋白酶活力(U/mg)		
	24L : 0D	12L : 12D	0L : 24D	24L : 0D	12L : 12D	0L : 24D	24L : 0D	12L : 12D	0L : 24D
白天	5.14 ± 0.36^a	5.86 ± 0.33^a	9.25 ± 0.43^a	0.56 ± 0.06^a	0.64 ± 0.02^a	0.75 ± 0.08^a	47.26 ± 1.44^a	48.00 ± 0.82^a	55.07 ± 1.04^a
夜晚	8.32 ± 0.69^b	10.95 ± 0.27^b	12.31 ± 0.35^b	0.76 ± 0.03^b	0.96 ± 0.01^b	0.83 ± 0.05^a	54.11 ± 4.48^a	71.45 ± 1.15^b	76.79 ± 6.11^b

注: 同列标有相同字母表示差异不显著($P>0.05$)

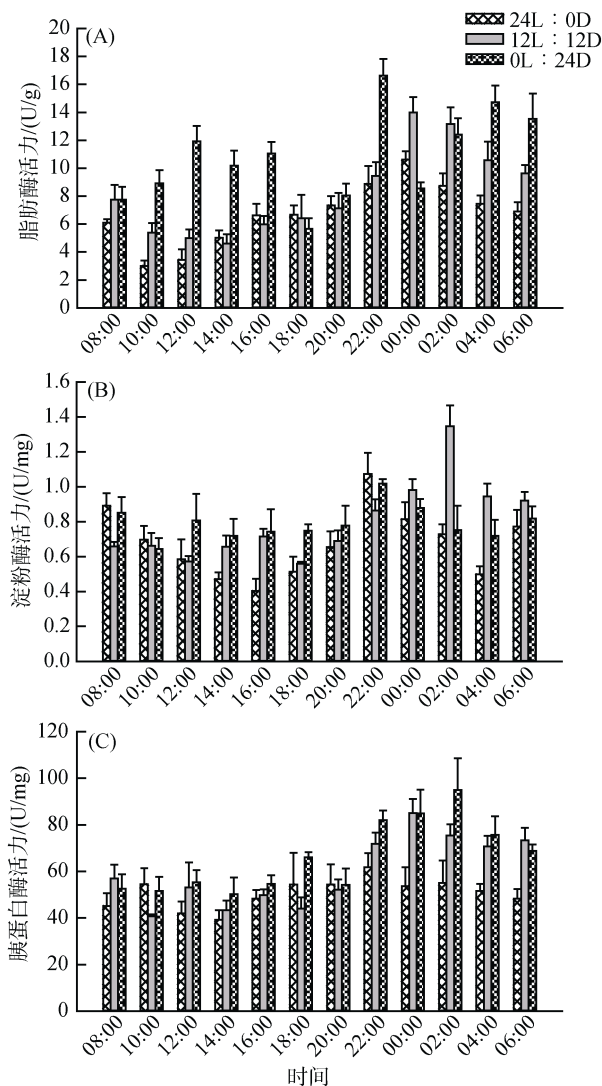


图 5 不同光照周期下刺参 3 种消化酶活力的昼夜变化
Fig.5 Diurnal variations of three digestive enzyme activities of *A. japonicus* under different photoperiods

3 讨论

3.1 光照对刺参摄食节律和摄食率的影响

多数棘皮动物都存在一个特定的昼夜活动节律,特别是摄食活动节律^[18]。棘皮动物的摄食节律受多种外界环境因子的影响,对于光照的变化,它们可通过自身调节做出适当的行为反应。如尤凯等^[19]研究发现,马粪海胆(*Hemicentrotus pulcherrimus*)在自然光照条件下表现明显的昼夜摄食节律,而在全遮盖的无光照条件下昼夜摄食强度差异消失,表明光照变化对其摄食节律有影响。Hammond^[20]、Conand^[21]和 Wiedemeyer^[22]研究发现,一些热带海参在自然光照条件下存在昼夜摄食节律。Dong 等^[23]通过不同光

照周期对刺参昼夜活动节律影响的实验得到了刺参在黑暗条件下摄食比例更大的结论。陈勇等^[24]报道了全光照条件破坏了刺参昼伏夜出的生活习性,影响了刺参的摄食,导致其生长缓慢。本实验中,全光照条件下,刺参的摄食比例和摄食率都相对较低;半光照半黑暗条件下,刺参在对应“白天”的摄食比例和摄食率明显低于对应“夜晚”的摄食比例和摄食率;而全黑暗条件下,刺参全天的摄食比例和摄食率都相对较高,这充分表明光照能抑制刺参的摄食活动,与前人的研究结果基本一致。

棘皮动物的摄食行为不但受到外界生态因子的影响,同时也可能与长期进化形成的体内生物钟调节有关。其生物钟的形成原因是复杂的,但捕食者的掠食作用是其中一个重要方面。一些动物可以通过调整其昼夜活动节律以避免其捕食者摄食高峰,从而躲避敌害的威胁^[26]。许多海胆白天隐蔽在一些岩礁的裂缝中,而在夜晚才爬出并进行摄食活动^[25-27]。Mercier 等^[28]认为小规格海参(*Holothuria scabra*)仅在夜晚进行摄食是对掠食者掠食的自我保护措施。本实验中,在全光照和全黑暗条件下,刺参仍保持在对应的“夜晚”比对应的“白天”有更高的摄食比例,说明刺参的摄食行为除了根据外界光照变化而改变,也可能受体内生物钟的调节作用。但生物钟并不是一成不变的,其可能通过长时间的外界条件适应而改变。另外,同样是在光照阶段,全光照条件的平均摄食比例高于半光照半黑暗条件下对应的“白天”的平均摄食比例,这也许表明随着光照时间的延长,由于饥饿等生理需求,更多刺参不得冒险开始在全光照条件下摄食。本实验采用红外摄像头对刺参的摄食行为进行观察,Carazo 等^[29]研究发现红外光对比目鱼(*Solea senegalensis*)的行为没有影响,但红外光对刺参的摄食行为是否有影响尚需进一步研究。

3.2 光照对刺参消化酶活力昼夜变化节律的影响

Van Wormhoudt^[30]认为光照周期是消化酶活力昼夜节律的最重要影响因子。本研究中,刺参在全黑暗条件下,其淀粉酶活力昼夜变化不显著,全光照条件和全黑暗条件下其胰蛋白酶活力昼夜变化都不显著;而在半光照半黑暗条件下其 3 种消化酶活力昼夜变化都显著,这说明光照周期不但影响刺参的摄食节律,同样对其消化酶活力昼夜变化有影响。王重刚等^[10]研究发现,真鲷(*Pagrosomus major*)的消化

酶活力昼夜变化也受光照的影响。本实验中, 比较 3 刺参种消化酶活力, 其脂肪酶的活力最低, 这可能与投喂的饲料中粗脂肪的含量(0.58%)较低有关, 也可能与刺参对脂肪的需求较低有关^[31]。

刺参除了在全黑暗条件下淀粉酶活力和全光照条件下胰蛋白酶活力没有昼夜差异外, 其余条件下消化酶活力对应“夜晚”的平均值显著大于对应“白天”的平均值, 这与摄食节律的变化规律基本一致。另外, 本实验中刺参消化酶活力的最大值出现的时间大多比摄食高峰早 0~4 h。这可能是由于刺参具有能够提前分泌消化酶为即将到来的摄食做好准备的调节机制。这种机制能够促使动物将消化和代谢等功能调整到最佳状态, 从而使它们能够在短时间内完成摄食活动, 减少被掠食者掠食的风险^[32]。从生理角度来讲, 这也能使动物更充分地吸收利用营养物质。Montoya 等^[33]研究海鲤(*Sparus aurata*)和 del Pozo 等^[34]研究欧洲鲈鱼都发现它们具有同样的调节机制。

另外, 刺参消化酶活力的昼夜变化可能受激素的调节, 不同种类酶的调节机制不一定相同, 至于激素的种类、分布以及调节作用, 有待于从细胞水平和分子生物学水平进行更深入的研究。

综上所述, 刺参摄食和消化酶活力的昼夜节律都受光照周期的影响。在刺参工厂化养殖生产中, 应根据具体的光照条件, 设定合理的投喂策略, 从而减少食物的浪费和避免水质的败坏。例如, 在光照时间段, 应少量投喂; 在黑暗时间段, 应增加投喂量; 在午夜时分, 可增加一次投喂。另外, 运用红外摄像机对动物的行为活动进行观察, 节省了人力, 同时避免了人为因素对动物的干扰, 为动物行为的研究提供了一个新的研究方法。

参考文献:

- [1] 周显青, 牛翠娟, 李庆芬. 光照对水生动物摄食, 生长和存活的影响[J]. 水生生物学报, 2000, 24(2): 178-181.
- [2] 武模戈. 光照对水生动物的影响[J]. 河南教育学院学报: 自然科学版, 2001, 10(2): 38-39.
- [3] Navarro D B, Rubio V C, Luz R K, et al. Daily feeding rhythms of Senegalese sole under laboratory and farming conditions using self-feeding systems[J]. Aquaculture, 2009, 291(1): 130-135.
- [4] Bolliet V, Aranda A, Boujard T. Demand-feeding rhythm in rainbow trout and European catfish: synchronisation by photoperiod and food availability[J]. Physiol Behav, 2001, 73(4): 625-633.
- [5] 林利民, 李益云, 万瑞景, 等. 牙鲆早期发育阶段的摄食节律[J]. 水产学报, 2006, 30(3): 329-334.
- [6] 乔志刚, 张国梁, 张英英, 等. 不同光照周期下鲆幼鱼的日摄食节律[J]. 水产科学, 2008, 27(10): 511-515.
- [7] 刘宇航, 陈国柱, 林小涛. 不同光照条件下叉尾斗鱼仔鱼摄食节律[J]. 生态学杂志, 2010 (6): 1161-1166.
- [8] 李健, 孙跃, 宋晓玲, 等. 中国对虾日摄食节律的试验观察[J]. 海洋科学, 1994, 5: 9-11.
- [9] 周文宗, 赵风兰. 克氏原螯虾摄食节律的研究[J]. 水产科学, 2007, 26(5): 271-274.
- [10] 王重刚, 陈品健. 真鲷幼鱼消化酶活性的昼夜变化[J]. 水产学报, 1999, 23(2): 199-201.
- [11] 李少菁, 汤鸿, 王桂忠. 锯缘青蟹幼体消化酶活力昼夜节律的实验研究[J]. 厦门大学学报, 2000, 39(6): 831-836.
- [12] 罗奇, 区又君, 李加儿, 等. 卵形鲳鲹消化酶活性的研究 盐度和昼夜变化对幼鱼消化酶活性的影响. 海洋渔业, 2010, 32(1): 54-58.
- [13] Okorie O E, Ko S H, Go S, et al. Preliminary study of the optimum dietary ascorbic acid level in sea cucumber, *Apostichopus japonicus* (Selenka)[J]. J World Aquacult Soc, 2008, 39(6): 758-765.
- [14] 范国宾. 辽东湾沿岸刺参工厂化养殖技术[J]. 河北渔业, 2010, 8: 16-17.
- [15] Sun J, Zhang L, Pan Y, et al. Feeding behavior and digestive physiology in sea cucumber *Apostichopus japonicus* [J]. Physiol Behav, 2015, 139: 336-343.
- [16] 房景辉, 张继红, 杜美荣, 等. 马氏刺蛇尾摄食习性的初步研究[J]. 中国水产科学, 2013, 20(5): 1086-1091.
- [17] Maxwell K H, Gardner J, Heath P L. The effect of diet on the energy budget of the brown sea cucumber, *Stichopus mollis* (Hutton)[J]. J World Aquacult Soc, 2009, 40(2): 157-170.
- [18] Reese E S. The complex behavior of echinoderms[M]. New York, John Wiley and Sons, 1966: 157-218.
- [19] 尤凯, 曾晓起, 陈大刚, 等. 青岛近岸海域马粪海胆摄食的实验生态学研究[J]. 生态学报, 2004, 24(5): 1006-1014.
- [20] Hammond L S. Patterns of feeding and activity in

- deposit-feeding holothurians and echinoids (Echinodermata) from a shallow back-reef lagoon, Discovery Bay, Jamaica[J]. *B Mar Sci*, 1982, 32(2): 549-571.
- [21] Conand C. Long-term movements and mortality of some tropical sea-cucumbers monitored by tagging and recapture[C]//*Biology of Echinodermata*. Balkema, Rotterdam, 1991: 169-175.
- [22] Wiedemeyer W L. Feeding behaviour of two tropical holothurians, *Holothuria* (Metriatyla) *scabra* (Jager 1833) and *H. (Halodeima) atra* (Jager 1833), from Okinawa, Japan[C]//*Proceedings of the Seventh International Coral Reef Symposium*. Guam, USA, 1992, 863-870.
- [23] Dong G, Dong S, Tian X, et al. Effects of photoperiod on daily activity rhythm of juvenile sea cucumber, *Apostichopus japonicus* (Selenka)[J]. *Chin J Oceanol Limnol*, 2011, 29: 1015-1022.
- [24] 陈勇, 高峰, 刘国山, 等. 温度, 盐度和光照周期对刺参生长及行为的影响[J]. *水产学报*, 2007, 31(5): 687-691.
- [25] Nelson B V, Vance R R. Diel foraging patterns of the sea urchin *Centrostephanus coronatus* as a predator avoidance strategy[J]. *Mar Biol*, 1979, 51(3): 251-258.
- [26] Carpenter R C. Predator and population density control of homing behavior in the Caribbean echinoid *Diadema antillarum*[J]. *Mar Biol*, 1984, 82(1): 101-108.
- [27] Tegner M J. The feasibility of enhancing red sea urchin, *Strongylocentrotus franciscanus*, stocks in California: an analysis of the options[J]. *Mar Fisher Rev*, 1989, 51(2): 1-22.
- [28] Mercier A, Battaglione S C, Hamel J F. Daily burrowing cycle and feeding activity of juvenile sea cucumbers *Holothuria scabra* in response to environmental factors[J]. *J Exp Mar Biol Ecol*, 1999, 239(1): 125-156.
- [29] Carazo I, Norambuena F, Oliveira C, et al. The effect of night illumination, red and infrared light, on locomotor activity, behavior and melatonin of Senegalese sole (*Solea senegalensis*) broodstock [J]. *Physiol Behav*, 2013, 118: 201-207.
- [30] Van Wormhoudt A. Variations immunoquantitatives de l' α amylase au cours du cycle d'intermue à différentes saisons chez *Palaemon serratus* (Crustacea: Decapoda: Natantia)[J]. *Mar Biol*, 1983, 74(2): 127-132.
- [31] 朱伟, 麦康森, 张百刚, 等. 刺参稚参对蛋白质和脂肪需求量的初步研究[J]. *海洋科学*, 2005, 29(3): 54-58.
- [32] Aranda A, Madrid J A, Sánchez-Vázquez F J. Influence of light on feeding anticipatory activity in goldfish[J]. *J Biol Rhythm*, 2001, 16(1): 50-57.
- [33] Montoya A, López-Olmeda J F, Yúfera M, et al. Feeding time synchronises daily rhythms of behaviour and digestive physiology in gilthead seabream (*Sparus aurata*)[J]. *Aquaculture*, 2010, 306(1): 315-321.
- [34] del Pozo A, Montoya A, Vera L M, et al. Daily rhythms of clock gene expression, glycaemia and digestive physiology in diurnal/nocturnal European seabass[J]. *Physiol Behav*, 2012, 106(4): 446-450.

Effects of photoperiods on feeding rhythm and digestive physiology of sea cucumber, *Apostichopus japonicus*

SUN Jia-min¹, WANG Fang¹, ZHANG Li-bin², LIN Cheng-gang²,
YANG Hong-sheng², KAN Ren-tao³

(1. Key Laboratory of Mariculture, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266003, China; 2. Key Laboratory of Marine Ecology and Environmental Sciences, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 3. Shandong Blue Ocean Science and Technology Co., Ltd., Laizhou 261413, China)

Received: Dec., 17, 2014

Key words: *Apostichopus japonicus*; Photoperiod; Feeding rhythm; Ingestion rate; Digestive enzyme activity

Abstract: In this paper, the feeding rhythm, ingestion rate (IR) and the diurnal rhythm of three digestive enzyme (lipase, amylase and trypsin) activities were studied in sea cucumbers under three photoperiods (24L: 0D, 12L: 12D and 0L: 24D). The results showed that: (1) under the photoperiod of 24L: 0D, sea cucumber had lower activities and feeding proportion (6%~10%) within 24 hours; under the photoperiod of 12L: 12D, sea cucumber had lower activities and feeding proportion (0~10%) in the light and had higher activities and feeding proportion in the dark; under the photoperiod of 0L: 24D, sea cucumber was in the active state all the time and had higher feeding proportion within 24 hours; under all the three photoperiods, the feeding peaks of sea cucumber occurred at 00: 00~02: 00 and the feeding proportions were significantly higher at night than those during the daytime ($P<0.05$); (2) the ingestion rates of sea cucumber were increased from 24L: 0D, 12L: 12D to 0L: 24D and the ingestion rate was significantly higher at night than those during the daytime ($P<0.01$); (3) the peak activities of three digestive enzymes of sea cucumber appeared at 22:00~02:00 under three photoperiods and the peak activities of digestive enzymes were 0~4 h earlier than the peak of feeding. Taken together, these results demonstrated that light was a powerful environment factor that influenced rhythms of feeding and digestive enzyme activities of *A. japonicus*, which had the ability to optimize the digestive processes for a forthcoming ingestion.

(本文编辑: 康亦兼)