

绿光辐照度对红鳍东方鲀视网膜、视蛋白基因及氧化应激的影响

张志博， 吴燕玲， 张怡宁， 蔡皓玮， 赵欣宇， 张小龙， 孙 研， 刘 鹰， 马 贺

设施渔业教育部重点实验室（大连海洋大学）， 辽宁 大连 116023

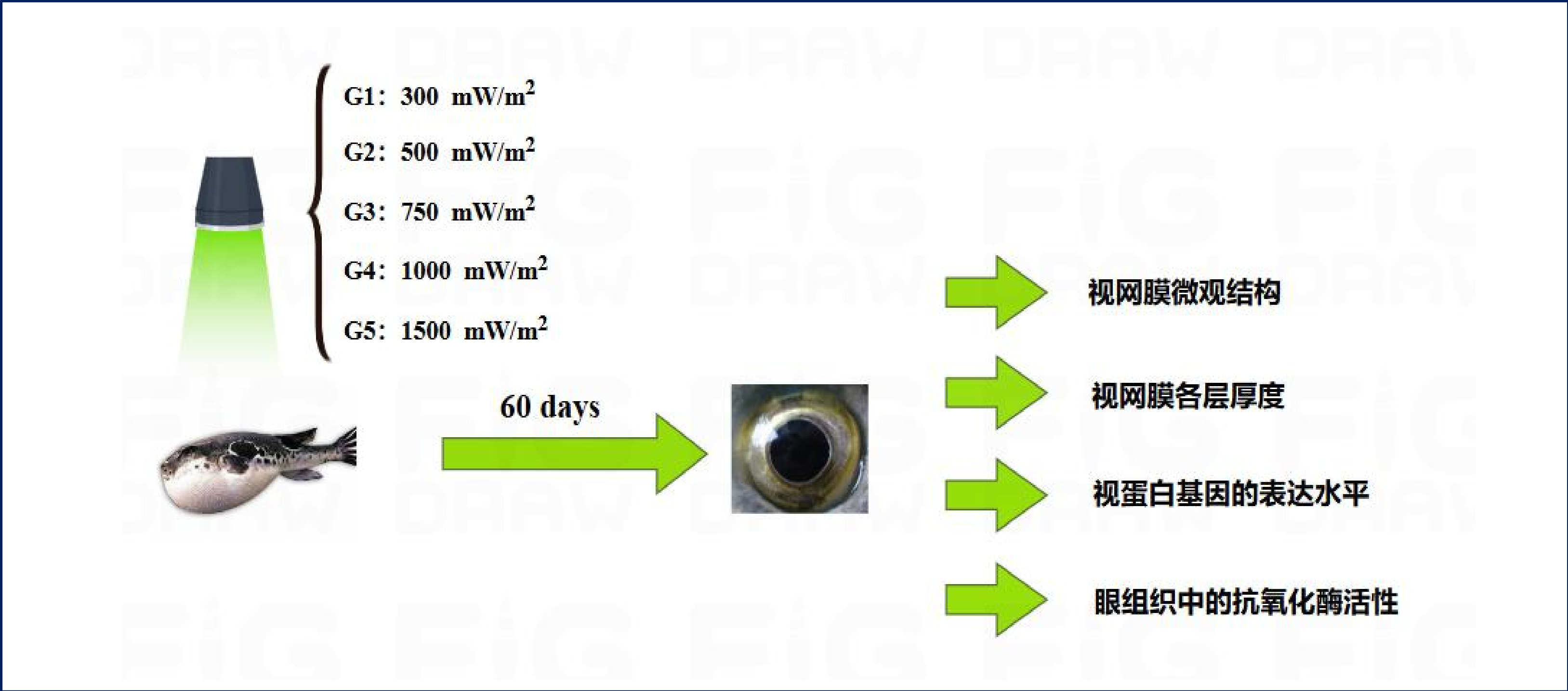
介绍

硬骨鱼类的视觉系统能够引导多种生理行为，而视网膜是视觉系统的重要器官，负责将光信号转化为神经信号并传递至大脑，其内含多种视蛋白，能在个体发育过程中适应光照变化以满足不同生理需求。

光是一种重要且复杂的环境因素，关系到鱼类的摄食、生长发育、成熟和繁殖等行为。不同的光照强度能够对硬骨鱼类的视觉系统产生影响，研究表明黑线鳉(*Melanogrammus aeglefinus*)的视网膜色素层在适当强度[1.8 mol/ (s · m²)] 的蓝光照射下可以被更好地激发，从而促进其摄食量 ;而在高辐照度(51 ~ 380 W/m²) 的照射下，欧洲鲈鱼 (*Dicentrarchus labrax*) 与大西洋鲑 (*Salmo salar*) 的视网膜都出现了不同程度的损伤。

红鳍东方鲀(*Takifugu rubripes*) 肉质细腻，味道鲜美，被视为中国最重要的水产养殖品种之一。前期研究发现绿光照射下其幼鱼具有更好的生长性能且应激水平降低。本研究分析不同 LED 绿光辐照度对其视网膜结构、各层厚度、视蛋白基因的表达及抗氧化酶活性的影响。筛选出在室内养殖中适宜红鳍东方鲀视觉发育的辐照度阈值，为优化其室内养殖的光照条件提供重要的理论依据。

材料方法



结果讨论

不同 LED 绿光辐照度对红鳍东方鲀视网膜结构的影响

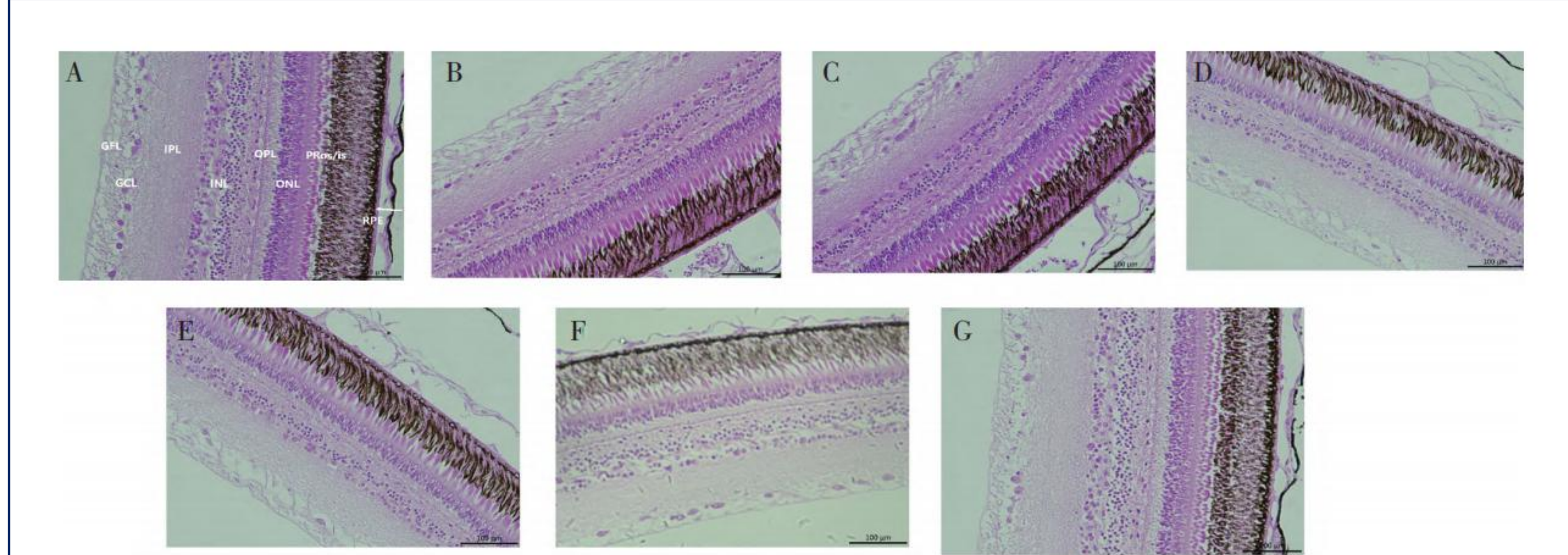


图 1 不同绿光辐照度下红鳍东方鲀视网膜的组织学切片

注 :A , G1(300 mW/m²) ; B , G2(500 mW/m²) ; C , G3(750 mW/m²) ; D , G4(1 000 mW/m²) ; E , G5(1 500 mW/m²) ; F , W(500 mW/m²) ; G , D; RPE , 色素上皮层; PRos/is , 感光层; ONL , 外核层; OPL , 外网层; INL , 内核层; IPL , 内网层; GCL , 神经节细胞层; GFL , 神经纤维层; 比例尺 = 100 μm

- 弱光条件下(D、G1 和 G2 组) 红鳍东方鲀幼鱼 RPE 中的黑色素颗粒发生了一定程度的聚集。相反，在 G4 和 G5 处理组中，黑色素颗粒发生了迁移。黑色素颗粒的重新定位可被视为鱼类视网膜的一种保护机制，当鱼类受到光刺激时，黑色素颗粒在 RPE 中向顶端方向迁移，形成一层保护光感受器的屏障，从而有效地保护视网膜免受强光的伤害。
- 除了迁移现象，G4 和 G5 处理组的黑色素颗粒密度也高于其他处理组，RPE 中黑色素颗粒的迁移现象和高密度特征可能有助于红鳍东方鲀幼鱼更有效地保护视网膜。

不同 LED 绿光辐照度对红鳍东方鲀视网膜各层厚度的影响

表 1 不同绿光辐照度下红鳍东方鲀视网膜各层厚度占比									
处理组	TT/μm	RPE/TT/%	PRos/is/TT/%	ONL/TT/%	OPL/TT/%	INL/TT/%	IPL/TT/%	GCL/TT/%	GFL/TT/%
G1	467.57±10.81 ^a	19.08±0.53	28.91 ±0.62 ^c	8.09 ±0.51 ^c	12.72±0.50 ^{ab}	14.45±0.25 ^b	20.42±0.42 ^{bc}	5.79±0.65	9.63±0.84 ^{ab}
G2	403.61±13.60 ^b	20.12±1.35	31.29 ±1.82 ^b	10.06 ±0.85 ^c	10.28±0.48 ^c	10.90±1.81 ^b	19.38±1.79 ^c	6.47±0.21	11.62±1.60 ^a
G3	369.37±5.63 ^c	21.22±0.87	35.86 ±0.80 ^a	10.49 ±0.55 ^c	13.18±0.92 ^a	7.31±0.65 ^c	17.32±1.17 ^d	7.07±1.08	8.77±1.33 ^{bc}
G4	317.12±8.25 ^d	20.31±0.77	31.26 ±0.39 ^b	8.51 ±0.73 ^{bc}	11.35±1.03 ^{bc}	9.38±0.95 ^{bc}	22.18±1.43 ^{ab}	7.66±0.66	9.65±1.18 ^{ab}
G5	300±4.05 ^c	20.12±0.31	31.76 ±1.62 ^b	9.76 ±1.30 ^{ab}	10.67±0.78 ^c	8.71±1.02 ^{bc}	22.21±0.83 ^{ab}	7.50±1.30	8.10±0.79 ^{bc}
W	309.46±3.57 ^{de}	19.81±1.43	29.7 ±1.21 ^{ab}	10.34 ±0.67 ^a	10.33±0.55 ^c	14.54±1.68 ^b	22.27±0.30 ^{ab}	5.83±0.55	6.99±0.88 ^{cd}
D	459.46±9.46 ^a	19.81±0.33	29.71 ±0.42 ^{ab}	9.11 ±0.60 ^{abc}	9.63±1.65 ^c	16.84±1.76 ^a	22.94±0.37 ^a	6.07±0.78	5.70±1.29 ^d

- 随着辐照度的不断升高，幼鱼的 TT 逐渐减小。说明感光细胞的数量或排列可能发生了变化，进而可能影响鱼类的视觉功能和视觉适应能力。
- G3 处理组的感光层占比(PRos/is/TT)、外核层占比(ONL/TT) 和外网层占比(OPL/TT) 最高。表明过高的辐照度(1 000 mW/m² 及以上) 可能对红鳍东方鲀幼鱼的视网膜造成损伤。

不同 LED 绿光辐照度对红鳍东方鲀视蛋白基因表达的影响

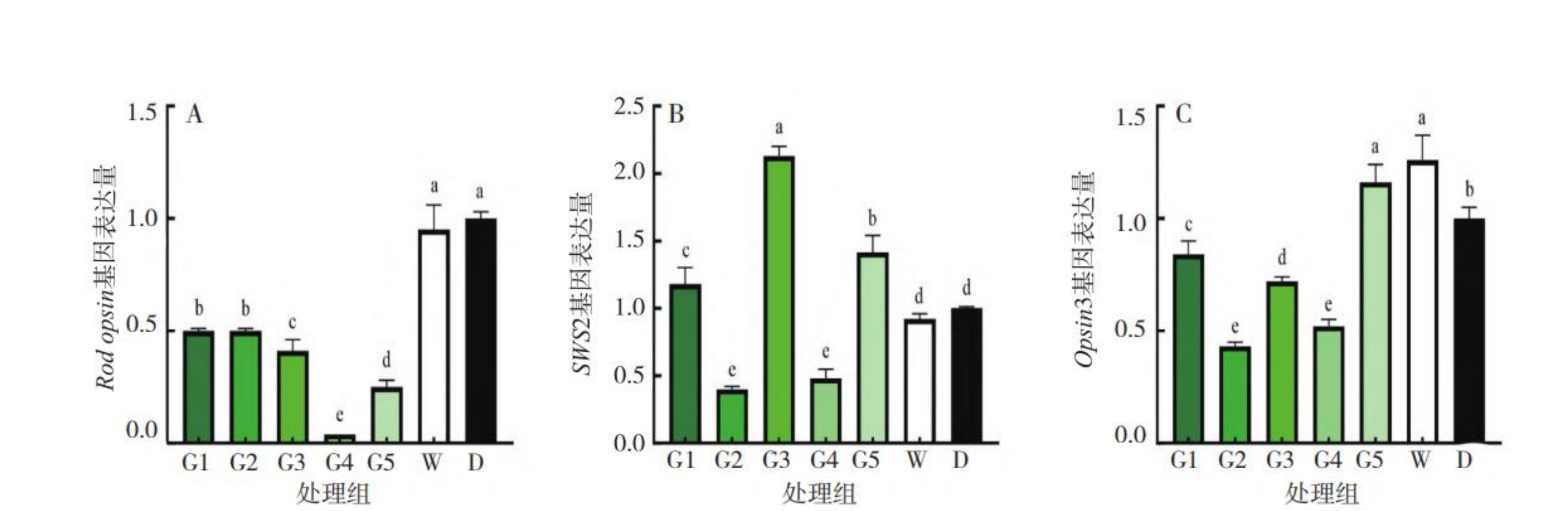


图2 不同绿光辐照度下红鳍东方鲀 *Rod opsin*(A)、*SWS2*(B) 和 *Opsin3*(C) 的基因表达量

- 黑暗和辐照度较低环境下 *Rod opsin* 的表达量最高，可能与杆状细胞负责昏暗条件下的视觉能力有关，为了增加昏暗条件下鱼类视网膜的光敏性，从而提高鱼类的视觉能力。
- G3 处理组的 *SWS2* 基因表达量最高，该基因对绿光(395 ~ 490 nm)敏感，表明红鳍东方鲀可能通过增加 SWS2 表达来适应绿光环境
- Opsin3* 在 W 和 G5 处理组中的基因表达量显著高于其他各组，其可能参与了对黑色素生成的调控。此外，*Opsin3* 还具有调节代谢稳态的功能，W 组和 G5 组的光环境可能激发了 *Opsin3* 更多地参与调节代谢稳态的机制。

不同 LED 绿光辐照度对红鳍东方鲀氧化应激的影响

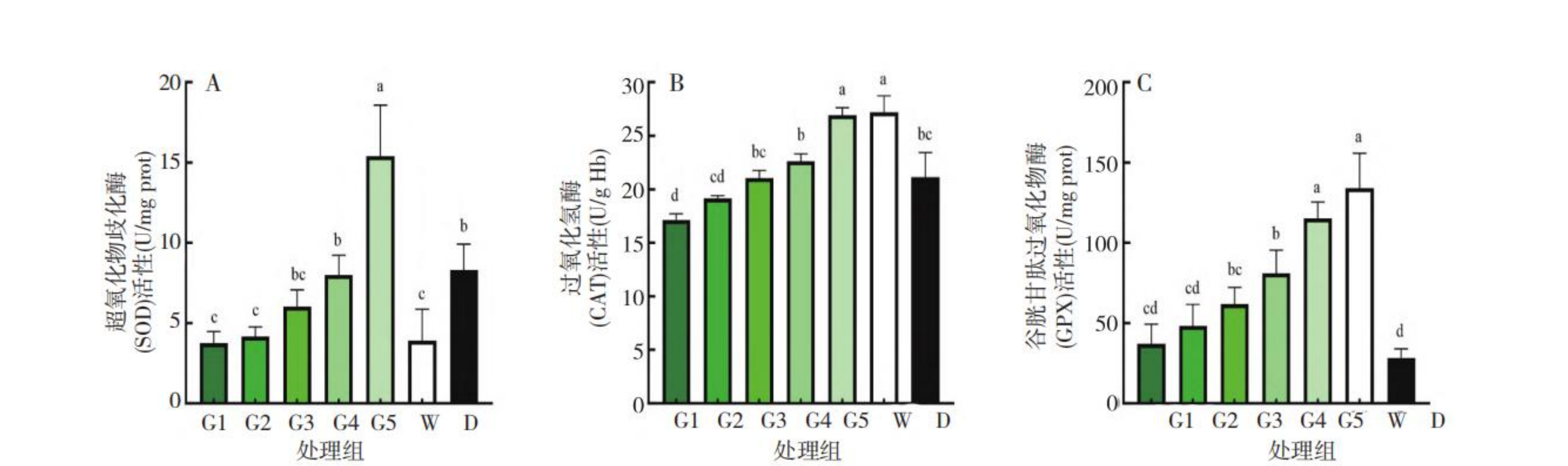


图 3 不同绿光辐照度下红鳍东方鲀 SOD (A)、CAT (B) 和 GPX (C) 的活性

- 红鳍东方鲀幼鱼的 SOD、CAT 和 GPX 活性的活性随着辐照度的升高也相应增加，未出现极端下降的现象。在绿光环境下，红鳍东方鲀体内的抗氧化防御系统可能通过调节抗氧化酶活性以对抗应激环境。

结论

- 在 300 mW/m² — 1 500 mW/m² 的绿光辐照度范围内，红鳍东方鲀的视觉系统未显示出明显的损伤现象。当辐照度超过 750 mW/m² 时，幼鱼的感光层及部分层厚度下降，并且其氧化应激程度随着辐照度的升高而加剧。
- 通过观察红鳍东方鲀视网膜的微观结构和视蛋白基因的变化，推测其视觉系统有能力针对不同辐照度的绿光环境进行适应性的调整。因此，建议在室内养殖环境中选用表面白色的养殖载体，采用绿光养殖红鳍东方鲀幼鱼并控制辐照度在 500 ~ 750 mW/m² 范围内。