

doi: 10.7541/2024.2023.0347

黑鲷幼鱼同生群内不同增重性能子群间背肌质构和脏器生理的差异

冉多映^{1*} 黄琳^{2*} 张利君¹ 刘哲宇¹ 郑嘉豪¹ 蒋宏雷² 王志锋¹

(1. 浙江海洋大学水产学院, 舟山 316022; 2. 宁波市海洋与渔业研究院, 宁波 315103)

摘要: 根据黑鲷(*Sparus macrocephalus*)幼鱼同生群内不同增重性能子群间背肌质构和脏器生理的差异, 揭示增重性能与机体代谢和取食运动对策与机制间的相关性, 对于精准遴选黑鲷幼鱼优质增殖群体和科学指导黑鲷幼鱼高效集约化养殖具重要现实意义。任选西沪港海区板式网箱养殖的黑鲷同生群幼鱼3000尾, 停食暂养1d后, 按体质量由大到小依次分为A [体质量(8.2±1.5) g, 出现率5%]、B [体质量(5.3±0.9) g, 出现率20.6%]、C [体质量(3.8±0.6) g, 出现率48.3%]、D [体质量(2.4±0.4) g, 出现率21%]、E [体质量(1.7±0.5) g, 出现率5.1%]等5个子群。在测量并统计背肌质构和脏器质量比例的基础上, 较系统开展了不同增重性能子群间耗氧率、窒息点及鳃组织和内脏相关功能酶活力的差异。结果表明: (1)根据脏器比例性状的聚类特征, 可较清晰地区分本研究所涉及各个子群; (2)背肌质构性状和耗氧率性状中随增重性能增强呈单调增加的仅为耐咀性和日均耗氧率, 耗氧昼夜节律除C子群呈昼均~夜均($P>0.05$)外, 其余子群均呈夜均>昼均($P<0.05$); (3)窒息点水中含氧量随增重性能增强呈阶梯式下降趋势, 其中与E子群窒息点水中含氧量具显著差异($P<0.05$)的仅为A、B子群, 呈E>A~B; (4)内脏淀粉酶、蛋白酶及AKP、ACP和ATP活力随增重性能增强均呈阶梯式下降趋势, SOD、CAT和POD酶活力均呈阶梯式上升趋势, 而脂肪酶和LDH酶活力则均呈先降后升趋势; (5)鳃组织SOD、POD、 Na^+/K^+ -ATPase和 $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ -ATPase酶活力均随增重性能增强呈阶梯式上升趋势, CAT酶活力则呈先降后升趋势。研究结果可为黑鲷生长性能评价体系构建、速生种质发掘和指导速生品种(品系)选择育种提供科学依据。

关键词: 增重性能; 耗氧率; 窒息点; 背肌质构; 酶活力; 黑鲷幼鱼

中图分类号: S965.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-3207(2024)06-0991-09



黑鲷(*Sparus macrocephalus* Bleeker)与黑棘鲷(*Acanthopagrus schlegelii*)同种异名, 隶属于鲈形目、鲷科、棘鲷属, 系主布于北太平洋西部, 常栖息于沙泥底质或多岩礁底质浅海、港湾和河口的暖温性底层经济鱼类^[1]。其肉坚味美、营养丰富、经济价值高, 深受消费者喜爱, 且具食性杂、生长快、温度和盐度耐受性强及不做长距离洄游等特性^[2], 是宁波市乃至浙江省最早开展网箱养殖和增殖放流的海水鱼种之一。据《舟山海域海洋生物志》记载, 位于浙江中部沿海的象山港, 历史上就曾是黑鲷的产卵场^[3]。

李有志等^[4]指出, 种内个体差异是自然界中普

遍存在的现象, 尤以个体大小为代表的表型差异最为直观且常见。增重性能作为表征同生群内个体生长速度差异的重要生物学指标, 可为其速生种质发掘和速生品种(系)人工定向选育提供重要线索。内脏生理既是衡量机体运动代谢和摄食代谢水平的重要依据, 也是指示机体抗逆能力和健康状况的重要内容。叶文婷等^[5]研究表明, 大黄鱼幼鱼同生群内不同增重性能子群间在机体内脏生理和竞食能力上均存在较大程度的差异, 即鱼类的增重性能与其机体代谢和取食运动对策密切相关。鱼类的躯干肌分为背部发达的轴上肌(Epaxial muscle)和腹部较薄的轴下肌(Hypaxial muscle), 其向前运动

收稿日期: 2023-10-31; 修订日期: 2024-01-10

基金项目: 宁波市重大科技任务攻关项目(2022Z183); 国家公益海洋专项(201405029)资助 [Supported by the Major Science and Technology Task Research Project of Ningbo, China (2022Z183); National Public Welfare Marine Project (201405029)]

作者简介: 冉多映(2000—), 女, 硕士研究生; 主要从事水产养殖研究。E-mail: 2118078950@qq.com 黄琳(1985—), 男, 工程师; 主要从事水产养殖研究。E-mail: 350927395@qq.com *共同第一作者

通信作者: 王志锋(1970—), 男, 教授; 主要从事水产养殖研究。E-mail: wzz_1225@163.com

的推进力主要借助轴上肌肌节的连续收缩与舒张产生的收缩波来实现^[6],即鱼类的运动能力取决于背肌的发达程度。系统剖析鱼类同生群内各子群间机体代谢特征和背肌发达程度随增重性能渐变而发生变化的原因,揭示增重性能与其取食运动对策间的相关性,对于科学解构鱼类同生群内增重性能分化的内在逻辑具有重要研究价值。本研究以用于人工增殖放流的黑鲷幼鱼同生群为研究对象,以背肌、鳃和内脏(鉴于多数实验组别的脏器质量过小,均不足以满足酶活力测定需求,为便于比较以全脏为测定材料)为靶组织,试图从背肌物性和机体代谢两个维度厘清黑鲷幼鱼同生群内基于增重性能渐变的生理异化特征,揭示不同增重性能子群间的机体代谢和取食运动对策分化机制,旨在黑鲷幼鱼生长性能评价体系的构建、速生种质的发掘和指导速生品种(系)人工选育提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料

实验用鱼 挑选宁波象山港湾水产苗种有限公司育苗车间出池后,在象山西沪港海域的板式网箱内常规养殖1个月的黑鲷同生群幼鱼。随机捞取其中形体完整、无病无伤的健壮个体3000尾,立即充气并停食暂养于若干直径1 m、高1.5 m的白色塑料桶(实际水位1.3 m)内。1d后,用Sartorius BS223S型电子天平(赛多利斯科学仪器有限公司,精度0.01 g)逐尾称量体质量并按其出现率分为5个子群(表1)。

实验用水 实验在宁波市象山港湾水产苗种有限公司内进行,实验用水为48h暗沉淀、二级沙滤处理后的自然海水,水温 $(26.5 \pm 0.3)^\circ\text{C}$ 、DO (8.06 ± 0.01) mg/L、pH 8.24 ± 0.01 、盐度 26.26 ± 0.21 。

1.2 实验方法

背肌质构的测定 各子群均任取实验鱼8尾作为测定对象,刮除背部鳞片,用解剖刀在背鳍前部基点位置为起点向后割取规格为长10 mm、宽7 mm、高4 mm大小的背肌组织肉块,采用TA.XT

plus型食品物性质构分析仪(英国)测定质构,进行硬度、黏性、弹性、内聚性、胶黏性、耐咀嚼性和回复性等7项指标的测定,采用TPA测量模式,测量探头为P/36R,测前速度1 mm/s、测中速度0.5 mm/s和测后速度1 mm/s,测试距离2 mm,测试时间间隔5s,探头上升高度距样品10 mm。

脏器质量比例性状的测定 各子群均任取实验鱼30尾作为测定对象,用Sartorius BSA223S型电子天平(赛多利斯科学仪器有限公司,精度1 mg)逐尾依次称量体质量、鳃质量、内脏质量和净体质量(取鳃组织和内脏后的体质量),并据此计算鳃系数(鳃质量/体质量)、内脏系数(内脏质量/体质量)、内脏净重比(内脏质量/净体质量)、鳃净重比(鳃质量/净体质量)和鳃脏比(鳃质量/内脏质量)。

耗氧率的测定 以直径32 cm的白色塑料桶(实验实际容积为7.5 L)为呼吸室,将各子群实验鱼分别置于对应的呼吸室内稳定30min后,随即以液体石蜡为绝氧材料密封水表面(石蜡厚度1 cm以上)开始实验,实验起始时刻均为18:00。各子群均设3个重复,每个重复各放入实验鱼1尾。实验周期为24h,每隔12h用移液管自呼吸室底部吸取15 mL水样,并即刻用哈希便携式sension™156多参数测量仪测定其DO值。在实验结束时,用定性滤纸吸尽实验鱼体表水分后,用Sartorius BSA223S型电子天平逐尾称量各呼吸室内实验鱼体质量,并据此计算各呼吸室的耗氧率(OR)。

窒息点的测定 以直径9 cm的透明塑料瓶(实验实际容积为1 L)为呼吸室,将各子群实验鱼分别置于对应的呼吸室稳定30min后,以液态石蜡为绝氧材料密封水表面(石蜡厚度1 cm以上)后即刻开始实验,实验起始时刻均为18:00。各子群均设4个重复,每个重复各放入实验鱼4尾。实验期间,持续观察实验鱼存活情况,并以玻璃棒多次轻触无反应作为死亡判别标准,待呼吸室内实验鱼死亡率为50%时,立即用哈希便携式sension™156多参数测量仪测定取自呼吸室底部水体的DO值。

表1 不同增重性能子群的体质量分组

Tab. 1 Grouping of body mass in subgroups with different growth performances

实验子群 Experimental subgroup	体质量 Body weight (g)			变异系数 Coefficient of variation (%)	出现率 Frequency (%)	样本数 Sample number (ind.)
	范围 Range	均值 Mean value	标准差 Standard deviation			
A	6.8—16.7	8.2	1.5	18.3	5.0	150
B	4.5—6.7	5.3	0.9	17.0	20.6	618
C	2.8—4.4	3.8	0.6	15.8	48.3	1449
D	2.0—2.7	2.4	0.4	16.7	21.0	630
E	0.7—1.9	1.7	0.5	29.4	5.1	153

相关功能酶活力的测定 各子群随机选取实验鱼5尾, 于冰盘上逐尾摘取鳃和内脏, 4℃双蒸水冲净、滤纸吸干表面水分并借助Sartorius BSA223S型电子天平逐一称重后, 立即分别放入已做好标记的样品袋内并置于-80℃冰箱中保存备测。其中, 涉及鳃组织的为抗氧化酶(SOD、CAT、POD)和ATP酶(Na^+/K^+ -ATPase、 $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ -ATPase), 涉及内脏的为消化酶(淀粉酶、脂肪酶、蛋白酶)、磷酸酶(ACP、AKP)和ATP酶(Na^+/K^+ -ATPase、 $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ -ATPase)。上述酶活力测试盒均购自南京建成生物工程研究所, 测试步骤及计算方法均按所附说明书。测定仪器为UV-1240型紫外可见分光光度计(岛津国际贸易有限公司)。

1.3 数据处理

整理实验测定数据, 应用ChiPlot网站(<https://www.chiplot.online/>)分别构建各子群基于脏器比例性状、背肌质构性状和耗氧率性状间欧氏距离的聚类热图; 借助SPSS24.0软件依次计算各子群的脏器质量比例性状、背肌质构性状、耗氧率性状、窒息点水中含氧量及鳃组织和内脏相关酶活力的均值和标准差, 并采取LSD多重比较法检验子群内和子群间的差异显著性(视 $P<0.05$ 为显著差异)。

2 结果

2.1 背肌质构及其聚类特征

由表2和图1A可见, 子群间背肌质构性状的差异及其聚类特征主要表现为(1)硬度、内聚性、胶黏性和回复性均呈 $A>B>C>D>E$, 黏性呈 $A<B<C<D\approx E$, 耐咀性呈 $A>B>C>D>E$ ($P<0.05$), 弹性除A子

群大于D、E子群($P<0.05$), E子群小于除D子群以外的其他子群外, 其余子群间均无显著差异($P>0.05$); (2)经聚类, 在背肌质构性状上首先聚为一支的分别为A—B子群和C—D子群。综上可知, 黑鲷幼鱼同生群内个体的背肌质构与增重性能间存在较强的关联性, 诸背肌质构性状中与增重性能排序完全一致的仅为耐咀性, 故可将其作为区分黑鲷幼鱼同生群内不同增重性能子群的重要依据。

2.2 脏器质量比例的估算及其聚类特征

由表3和图1B可见, 子群间脏器比例性状的差异及其聚类特征主要表现为(1)鳃系数和鳃脏比均无显著差异($P>0.05$), 鳃净重比呈 $A<B\approx C\approx D\approx E$, 内脏系数、内脏净重比均呈 $A<C\approx E$, 且B、D子群与其他子群均无显著差异($P>0.05$); (2)经聚类, 在脏

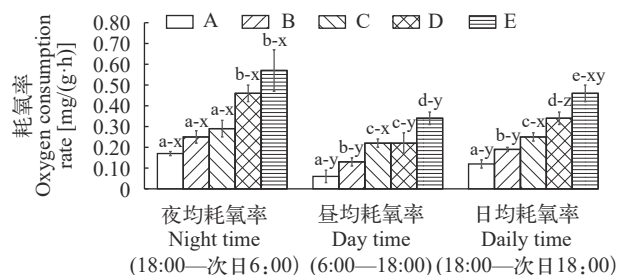


图1 基于脏器比例性状、背肌质构性状和耗氧率性状的聚类热图

Fig. 1 Cluster heatmap based on organ ratio traits, dorsal muscle morphology traits, and oxygen consumption rate traits

表3 实验子群间脏器质量比例性状的差异

Tab. 3 Differences in organ mass ratio traits among experimental subgroups (mean±SE)

脏器比例性状 Organ proportional trait	A	B	C	D	E
鳃系数 (鳃质量/体质量) Gill coefficient (gill mass/body mass)	0.031±0.003 ^a	0.033±0.003 ^a	0.033±0.004 ^a	0.033±0.005 ^a	0.033±0.005 ^a
内脏系数 (内脏质量/体质量) Visceral coefficient (visceral mass/body mass)	0.194±0.022 ^a	0.217±0.035 ^{ab}	0.233±0.058 ^b	0.221±0.054 ^{ab}	0.238±0.080 ^b
内脏净重比 (内脏质量/净体质量) Visceral net-weight ratio (visceral mass/net body mass)	0.242±0.034 ^a	0.280±0.057 ^{ab}	0.315±0.118 ^b	0.289±0.079 ^{ab}	0.326±0.140 ^b
鳃净重比 (鳃质量/净体质量) Gill net weight ratio (gill mass/net body mass)	0.039±0.003 ^a	0.042±0.004 ^b	0.043±0.005 ^b	0.043±0.006 ^b	0.044±0.007 ^b
鳃脏比 (鳃质量/内脏质量) Gill-visceral ratio (gill mass/visceral mass)	0.163±0.028 ^a	0.154±0.030 ^a	0.150±0.044 ^a	0.184±0.152 ^a	0.234±0.461 ^a

表2 实验子群间背肌质构的差异

Tab. 2 Differences in dorsal muscle morphology among experimental subgroups (mean±SE)

测定指标 Determination standard	A	B	C	D	E
硬度 Hardness	15350±3665 ^a	9398±1518 ^b	6782±643 ^c	5287±523 ^c	2703±3314 ^d
黏性 Viscosity	-322.7±76.4 ^a	-154.4±36.1 ^b	-111.6±11.7 ^c	-55.8±7.3 ^d	-53.0±10.0 ^d
弹性 Elasticity	0.582±0.033 ^a	0.560±0.056 ^{ab}	0.548±0.080 ^{ab}	0.504±0.039 ^{bc}	0.479±0.045 ^c
内聚性 Cohesion	0.849±0.037 ^a	0.657±0.068 ^b	0.513±0.040 ^c	0.471±0.042 ^c	0.372±0.030 ^d
胶黏性 Glueyness	11913±1724 ^a	6872±820 ^b	3478±396 ^c	2574±640 ^c	747±139 ^d
耐咀性 Mouthfastness	6425.6±1208.4 ^a	3434±282.5 ^b	2481.9±239.4 ^c	1507.6±253.4 ^d	584.4±48.2 ^e
回复性 Resilience	0.747±0.064 ^a	0.500±0.053 ^b	0.357±0.031 ^c	0.312±0.044 ^c	0.196±0.024 ^d

注: 同一行中不同字母代表组间差异显著($P<0.05$), 下同

Note: In the same line, different letters represent significant differences between groups ($P<0.05$), the same applies below

器比例性状上首先聚为一支的仅为A—B子群,而后再依次与C、D、E子群聚在一起,即脏器比例性状聚类随增重性能由强到弱表现出鲜明的连续性。综上可知,借助脏器比例性状的差异及其聚类特征,可较清晰地地区分本研究所涉及各个子群。

2.3 耗氧率及其聚类特征

由图1C和图2C可见,子群间耗氧率及其聚类

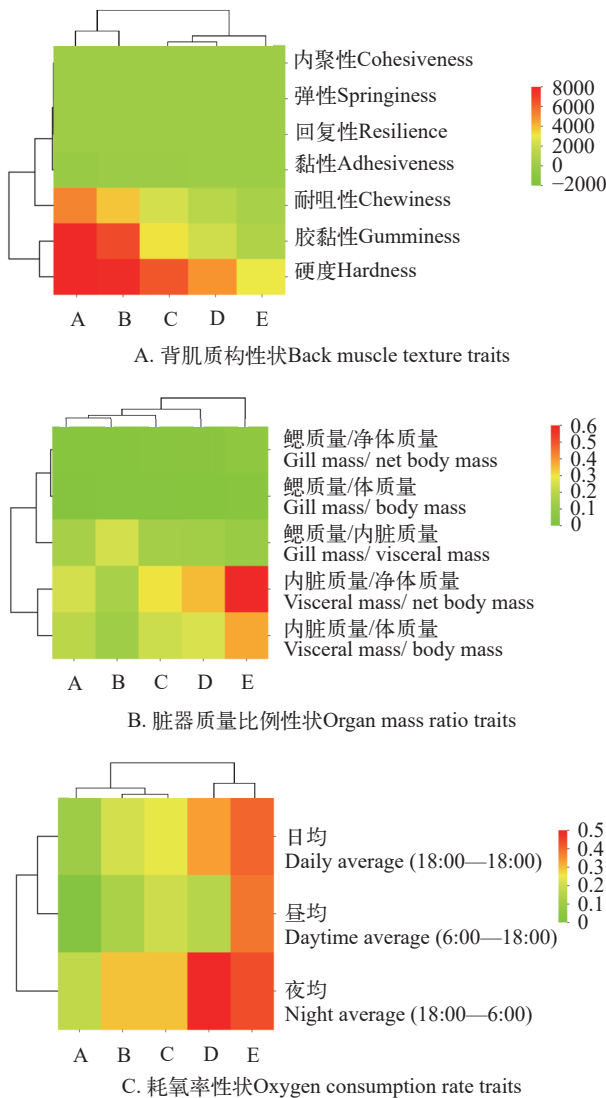


图2 实验子群间昼均、夜均和日均耗氧率的差异

Fig. 2 Differences in diurnal, nocturnal, and daily oxygen consumption rates among experimental subgroups

上标a、b、c、d、e表示组间差异,上标x、y、z表示组内差异,不同字母表示存在显著性差异($P<0.05$),无字母或相同字母表示差异不显著($P>0.05$);下同

The superscripts a, b, c, d and e indicate the difference among groups, and the superscripts x, y and z indicate the difference within groups, values with different superscript letters indicate significant difference ($P<0.05$), while with no or the same superscript letter mean no significant difference ($P>0.05$), the same applies below

特征差异主要表现为(1)昼均、夜均和日均耗氧率分别呈 $A<B<C\approx D<E$ 、 $A\approx B\approx C<D\approx E$ 和 $A<B<C<D<E$ ($P<0.05$); (2)耗氧昼夜节律上,除C子群呈昼均 $\approx$ 夜均 ($P>0.05$)外,其余子群均呈夜均 $>$ 昼均 ($P<0.05$); (3)经聚类,在耗氧率性状上首先聚为一支的分别为B—C子群和D—E子群,而后A子群再与B—C子群聚在一起。综上可知,黑鲷幼鱼同生群内个体的耗氧率与其增重性能具较强的关联度, C子群的耗氧昼夜节律已发生根本性改变,日均耗氧率与增重性能排序完全一致,可将其作为区分黑鲷幼鱼同生群内不同增重性能子群的重要依据。

2.4 窒息点

由图3可见,窒息点水中氧含量呈 $A\approx B<E$,且C、D子群与其他子群均无显著差异 ($P>0.05$),即实验鱼的耐低氧能力有随其增重性能增强而呈阶梯式提高的趋势。

2.5 内脏消化酶、磷酸酶和乳酸脱氢酶活力

由图4可见,子群间内脏消化酶、磷酸酶和乳酸脱氢酶活力的异同主要表现为(1)淀粉酶和脂肪酶活力分别呈 $A\approx C<B<D<E$ 和 $A\approx B\approx D\approx E>C$,蛋白酶活力呈 $A<D\approx E$,且B、C与其他子群间均无显著差异 ($P>0.05$); (2) AKP和ACP活力分别呈 $A<B\approx C\approx D<E$ 和 $A<B\approx C<D<E$; (3) LDH活力呈现出C子群最低 ($P<0.05$), E子群最高 ($P<0.05$), B与A、D子群均无显著差异 ($P>0.05$),以及A子群显著低于D子群 ($P<0.05$)的特征。综上表明,随增重性能增强,内脏淀粉酶、蛋白酶以及AKP和ACP活力均呈阶梯式下降的趋势,脂肪酶和LDH活力大体上均呈先降后升的趋势。

2.6 抗氧化酶和ATP酶活力

由图5和图6可见,子群间抗氧化酶和ATP活力的异同主要表现为(1)鳃组织SOD和POD活力分别呈 $A\approx B>C\approx D\approx E$ 和 $A>B>C>D\approx E$, CAT活力呈 $A>C\approx E>D$,且B仅与D具显著差异 ($P<0.05$),而内脏SOD、CAT和POD活力则均呈 $A>B\approx C\approx D\approx E$; (2)鳃组织

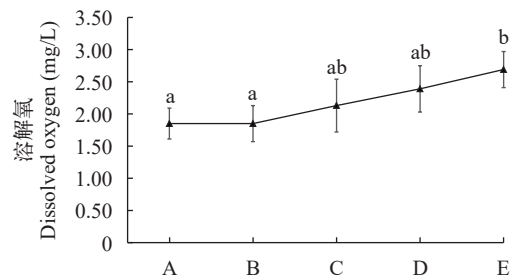


图3 实验子群间窒息点水中含氧量的差异

Fig. 3 Differences in critical oxygen levels in water among experimental subgroups

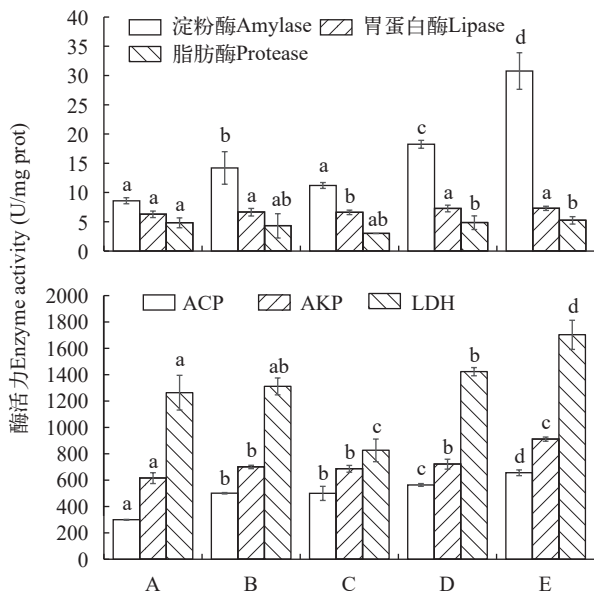


图4 实验子群间内脏消化酶、磷酸酶和乳酸脱氢酶活力的差异

Fig. 4 Differences in digestive enzyme, phosphatase, and lactate dehydrogenase activity among experimental subgroups

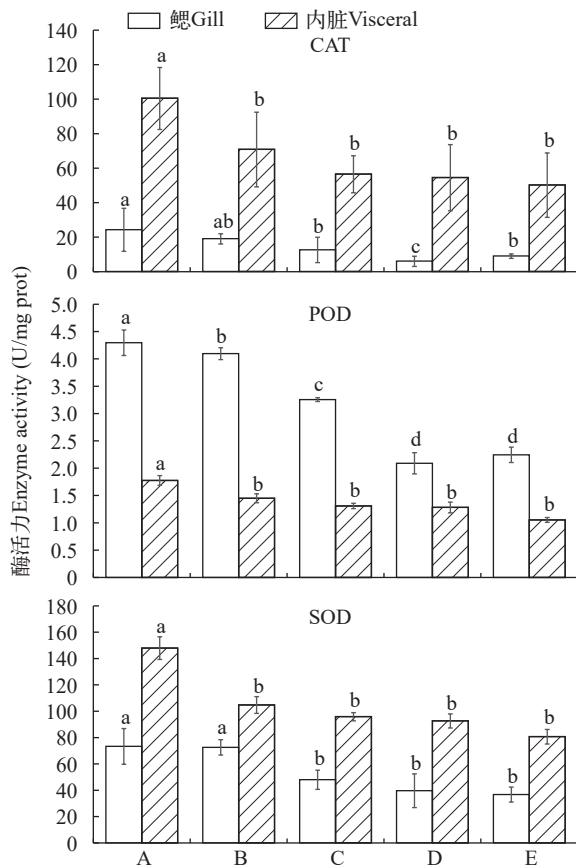


图5 实验子群间鳃组织和内脏抗氧化酶活力的差异

Fig. 5 Differences in antioxidant enzyme activity in gill tissues and internal organs among experimental subgroups

$\text{Na}^+/\text{K}^+-\text{ATPase}$ 和 $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}-\text{ATPase}$ 活力均呈 $A \approx B > C \approx D \approx E$, 内脏 $\text{Na}^+/\text{K}^+-\text{ATPase}$ 和 $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}-\text{ATPase}$ 活力分别呈 $A < B \approx C \approx D < E$ 和 $A \approx B \approx C \approx D < E$ 。综上表明, 随增重性能增强, 实验鱼鳃组织SOD、POD、 $\text{Na}^+/\text{K}^+-\text{ATPase}$ 和 $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}-\text{ATPase}$ 活力均呈阶梯式上升趋势, CAT活力呈先降后升趋势, 内脏抗氧化酶和ATP活力均分别呈阶梯式上升和下降趋势。

3 讨论

3.1 不同增重性能子群间竞食运动能力和取食策略的差异

硬度表表征肌肉质构的重要指标, 与肌纤维的含量和结构均有着极为密切的关系。据报道, 鱼肉的硬度随肌纤维直径的变小和单位面积肌纤维密度的增加而增大^[7-11]。本研究实验鱼硬度、内聚性、胶黏性和回复性均呈 $A > B > C > D > E$, 耐咀嚼性呈 $A > B > C > D > E$ ($P < 0.05$), 以及背肌质构性状上首先聚为一支的分别为A—B子群和C—D子群的结果, 既印证了林婉玲等^[12]所述受检组织的硬度越大, 黏聚性就越大, 恢复形变的速度就越快, 咀嚼所需的能量也越高的观点的可靠性, 也揭示了竞食运动能力差异是导致黑鲷幼鱼同生群内个体间增重性能产生分化的主因, 即背肌硬度越大, 竞食运动速度就越快, 增重性能也就越强。

动物的摄食代谢和运动代谢是相互关联的两个生理过程^[13, 14]。动物往往会根据所处食场环境和竞食地位选择相应的取食对策以利生存和发展。游泳运动作为支持鱼类觅食活动的重要生理行为, 其运动能力与运动方式均与其摄食策略有着

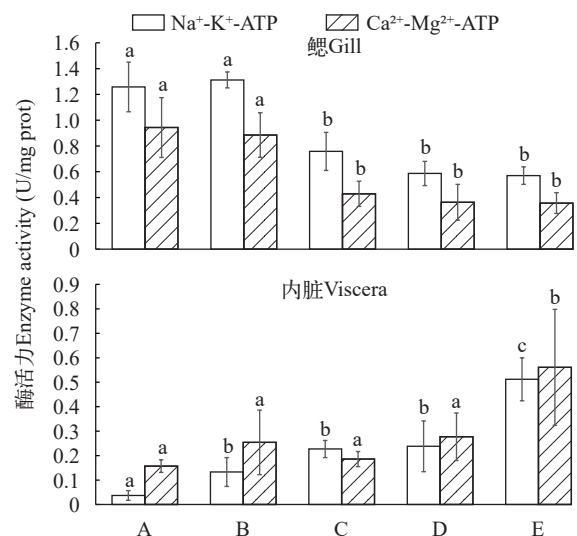


图6 实验子群间鳃组织和内脏ATP酶活力的差异

Fig. 6 Differences in ATPase activity in gill tissues and internal organs among experimental subgroups

极为密切的关联,并将深刻影响其增重机制^[4]。鱼类在持续运动能力与暴发运动能力之间存在权衡^[15]。研究发现,在投喂时段相对固定且时长较短的网箱高密度养殖场景下,大黄鱼幼鱼同生群内个体呈现出暴发游泳运动能力越强,增重速度越快,持续游泳运动能力越强,增重速度越慢的竞食生长特征^[4]。本研究涉黑鲷同生群幼鱼内不同增重性能子群间也应存在各自不同的取食对策。“器官代谢活性假说”指出,动物的活性脏器系数与其代谢水平呈正相关^[16, 17]。由此,本研究实验鱼鳃系数、鳃脏比、鳃净重比、内脏系数和内脏净重比经聚类首先聚为一支的仅为A—B子群,而后再依次与C、D、E子群聚在一起,表明黑鲷幼鱼同生群内已形成了随增重性能渐次变化的机体代谢强度连续谱。耗氧率系用以表征水生动物机体能量代谢水平的重要生理指标。在本研究中,实验鱼日均耗氧率呈A<B<C<D<E($P<0.05$)的情形,与叶文婷等^[5]对大黄鱼幼鱼同生群的研究结果完全一致,表明日均耗氧率可作为直观反映幼鱼同生群内各子群间竞食机体代谢能耗和取食对策差异的重要依据。结合本研究实验鱼昼均、夜均耗氧率分别呈A<B<C~D<E和A<B~C<D<E,耗氧昼夜节律除C子群呈昼均~夜均($P>0.05$)外,其余子群均呈昼均<夜均($P<0.05$),以及在耗氧率性状上首先聚为一支的分别为B—C子群和D—E子群的结果,既真实反映了D、E子群通过提高摄食运动频次以补偿竞食劣势,是导致它们在昼均、夜均和日均耗氧率上均较A、B子群显著高企的重要原因;也客观阐释了C子群作为增重性能的中间过渡类群,为顺应投喂场景,经权衡所选定的通过适度上调白昼摄食运动频次和下调夜间摄食运动频次以切实提高取食成功率的“消耗-获利”模式,是导致其夜均和昼均耗氧率分别与B、D子群无显著差异($P>0.05$),机体代谢强度更倾向于B子群,以及耗氧昼夜节律发生根本性改变的主要原因。基于上述分析,可基本判定黑鲷幼鱼随增重性能减弱已达成了间歇性暴发运动占比由高到低和持续性巡游运动占比由低到高的取食运动连续谱,与机体代谢水平由低到高连续谱间的有机耦合,并据此形成了与之相匹配的如下3种不同取食对策,即(1)以处于优势竞食地位的A、B子群为代表,建立了以间歇性暴发运动占比显著高企为主要特征的低耗高效取食对策;(2)以处于劣势竞食地位的D、E子群为代表,建立了以持续性巡游觅食运动占比显著高企为主要特征的高耗低效取食对策;(3)C子群作为中间过渡类群,建立了通过适度调整固有耗氧昼夜节律来提高取食成功率的

运动对策。

3.2 不同增重性能子群间的脏器生理差异

鳃不仅是黑鲷唯一的供氧器官,而且还在调节其体内外渗透压平衡中发挥着十分重要的作用。活性氧(Reactive oxygen species, ROS)系有氧代谢产生的对细胞具毒害作用的副产物^[18],故供氧压力的显著高企势必会导致鱼类鳃组织ROS的快速积累。SOD、CAT和POD作为抗氧化保护酶系统重要成员,在维系体内ROS动态平衡和细胞正常代谢中起着十分重要的作用^[11]。Na⁺/K⁺-ATPase和Ca²⁺/Mg²⁺-ATPase作为调控细胞内外液渗透压的跨膜蛋白^[19],系表征鳃组织生理状况健康与否的重要酶类。据报道,体内累积过多的ROS不仅会通过阻断有氧呼吸链减少ATP的形成,而且还会通过破坏细胞膜的流动性和完整性引起ATP活性的下降,进而造成细胞内各类大分子的氧化损伤和生物有机体的各种生理病变^[20, 21]。因此,当ROS的积累速度持续越过鳃组织抗氧化防御能力的临界时,必将显著抑制其抗氧化酶和ATP活力的进一步提高。本研究实验鱼鳃组织SOD、Na⁺/K⁺-ATPase和Ca²⁺/Mg²⁺-ATPase活力均呈A~B>C~D~E, POD活力呈A>B>C>D~E,以及CAT活力呈A>C~E>D,且B仅与D具显著差异($P<0.05$)的结果,有力支持了上述有关A、B子群采取以间歇性暴发运动占比显著高企为主要特征的低耗高效取食对策,和D、E子群采取以持续性巡游觅食运动占比显著高企为主要特征的高耗低效取食对策的推论,即持续性巡游觅食运动占比显著高企所引发的鳃组织供氧不足,是导致其鳃组织ATP活性和ROS清除能力显著受抑的主因。

内脏系动物机体代谢的核心场所。LDH存在于机体所有组织细胞的胞质内,系能量代谢过程中参与糖酵解和糖异生工程中催化乳酸和丙酮酸之间氧化还原反应的重要酶类,其活力以内脏组织为最高。室息点为可直接反映水生动物耐低氧能力的重要生理指标^[22]。本研究中C子群内脏LDH和脂肪酶活力均显著低于其他子群($P<0.05$),且A子群内脏LDH活力显著低于D、E子群($P<0.05$)的结果,既表明间歇性暴发运动和持续性巡游觅食运动占比的高企均会通过强化黑鲷幼鱼的肝脏糖异生途径,来提高脂肪氧化水平以增加其觅食运动所需能量的供给,也进一步揭示了由持续性巡游觅食运动占比高企引起的机体供氧不足,和淀粉水解作用因糖酵解代谢途径强化而获得增强,分别是导致E子群耐低氧能力显著低于A、B子群和淀粉酶活力呈A<B<D<E的主要原因。ACP系溶酶体的标志酶,在细胞内消化过程中具重要作用,AKP作为营养吸

收的标志物^[23], 通过与ATP的共同作用, 可将消化酶作用产生的小的多肽和氨基酸穿过细胞膜^[24, 25]。本研究实验鱼内脏SOD、CAT和POD均呈A>B≈C≈D≈E, AKP和ACP活力分别呈A<B≈C≈D<E和A<B≈C<D<E, Na^+/K^+ -ATPase和 $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ -ATPase活力分别呈A<B≈C≈D<E和A≈B≈C≈D<E, 以及蛋白酶活力呈A<D≈E, 且B、C与其他子群间均无显著差异($P>0.05$), 在反映机体消化代谢水平随增重性能下降呈趋势性增强的同时, 既揭示了机体代谢能耗的显著降低是导致A子群内脏保持较高ROS清除能力的根本原因, 也进一步证实了脏器比例性状聚类所示随增重性能渐次变化的机体代谢强度连续谱的可靠性, 即降低机体代谢能耗是提升黑鲷幼鱼同生群增重性能的关键。

4 结论

(1)可根据脏器质量比例性状的聚类特征, 较清晰地区分黑鲷幼鱼同生群内不同增重性能子群; 竞食运动能力差异是导致黑鲷幼鱼同生群内个体间增重性能产生分化的主因, 即背肌硬度越大, 竞食运动速度就越快, 增重性能也就越强; (2)黑鲷幼鱼日均耗氧率均呈A>B>C>D>E ($P<0.05$), 耗氧昼夜节律除C子群呈昼均≈夜均($P>0.05$)外, 其余均呈夜均>昼均($P<0.05$), 窒息点水中含氧量随增重性能下降呈趋势性上升态势; (3)内脏淀粉酶和脂肪酶活力分别呈A≈C<B<D<E和A≈B≈D≈E>C, 蛋白酶活力随增重性能增强总体上表露出趋势性提高的特征, AKP和ACP活力依次呈A<B≈C≈D<E和A<B≈C<D<E, LDH活力以C子群为最低($P<0.05$), E子群为最高($P<0.05$); (4)鳃组织抗氧化酶(SOD、CAT、POD)和ATP(Na^+/K^+ -ATPase、 $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ -ATPase)酶活力随增重性能的增强总体上均呈阶梯式上升趋势; 内脏SOD、CAT和POD活力均呈A>B≈C≈D≈E, Na^+/K^+ -ATPase和 $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ -ATPase活力分别呈A<B≈C≈D<E和A≈B≈C≈D<E; (5)黑鲷幼鱼同生群通过耦联取食运动和机体代谢水平, A、B子群形成了以间歇性爆发运动占比显著高企为主要特征的低耗取食对策, D、E子群形成了以持续性巡游觅食运动占比显著高企为主要特征的高耗取食对策, C子群则形成了通过适度调整固有耗氧昼夜节律来提高取食成功率的运动对策; (6)间歇性爆发运动和持续性巡游觅食运动占比的高企均会通过强化肝脏糖异生途径来提高脂肪氧化水平, 以增加觅食运动所需能量的供给。但由持续性巡游觅食运动占比显著高企引发的鳃组织供氧不足, 不仅会降低机体耐低氧能力并抑制鳃组织抗氧化酶和

ATP酶的活性, 而且还会通过强化糖酵解途径和提高内脏ATP活性来补偿对消化吸收带来的负面影响, 是导致实验鱼代谢能耗高企和增重性能显著减弱的本质原因。

参考文献:

- [1] Fujian Society of Fisheries, Fujian Fisheries Technology Extension Station. Primary Color Atlas of Common Aquatic Organisms in Fujian [M]. Fuzhou: Fujian Science & Technology Publishing House, 2014: 197. [福建省水产学会, 福建省水产技术推广总站. 福建常见水产生物原色图册 [M]. 福州: 福建科学技术出版社, 2014: 197.]
- [2] Zhu D F. Lecture on artificial breeding technology of *Sparus macrocephalus*-the first lecture on biological characteristics and general situation of breeding of *Sparus macrocephalus* [J]. *Journal of Aquaculture*, 1996, 17(1): 30-32. [朱德芬. 黑鲷人工养殖技术讲座——第一讲黑鲷生物学特性及增殖概况 [J]. 水产养殖, 1996, 17(1): 30-32.]
- [3] Editorial Department of 'Putuo County Annals'. Marine Biology of Zhoushan Sea Area [M]. Hangzhou: Zhejiang People's Publishing House, 1994: 203-204. [《普陀县志》编辑部编. 舟山海域海洋生物志 [M]. 杭州: 浙江人民出版社, 1994: 203-204.]
- [4] Li Y Z, Jiang H L, Liu Z Y, et al. Comparative analysis of juvenile large yellow croaker (*Larimichthys crocea*) among subgroups with different growth performances from a same congenital group in morphology and quality [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2023, 54(5): 1488-1497. [李有志, 蒋宏雷, 刘哲宇, 等. 大黄鱼(*Larimichthys crocea*)幼鱼同生群内不同增重性能子群间的形质差异 [J]. 海洋与湖沼, 2023, 54(5): 1488-1497.]
- [5] Ye W T, Jiang H L, Jiang L, et al. Physiological differences in the organs of different growth performance subgroups within the same cohort of large yellow croaker (*Larimichthys crocea*) juveniles [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2024, 55(1): 223-231. [叶文婷, 蒋宏雷, 江柳, 等. 大黄鱼(*Larimichthys crocea*)幼鱼同生群内不同增重性能子群间的脏器生理差异 [J]. 海洋与湖沼, 2024, 55(1): 223-231.]
- [6] Liu L Y, Zheng G M. General Zoology [M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 2009. [刘凌云, 郑光美. 普通动物学 [M]. 第4版. 北京: 高等教育出版社, 2009.]
- [7] Hatae K, Yoshimatsu F, Matsumoto J J. Role of muscle fibers in contributing firmness of cooked fish [J]. *Journal of Food Science*, 1990, 55(3): 693-696.
- [8] Hurling R, Rodell J B, Hunt H D. Fiber diameter and fish texture [J]. *Journal of Texture Studies*, 1996, 27(6): 679-685.
- [9] Periago M J, Ayala M D, López-Albors O, et al. Muscle cellularity and flesh quality of wild and farmed sea bass, *Dicentrarchus labrax* L [J]. *Aquaculture*, 2005, 249(1/

- 2/3/4): 175-188.
- [10] Lin W L, Guan R, Zeng Q X, *et al.* Factors affecting textural characteristics of dorsal muscle of crisp grass carp [J]. *Journal of South China University of Technology* (Natural Science Edition), 2009, **37**(4): 134-137. [林婉玲, 关熔, 曾庆孝, 等. 影响脆肉鲩鱼背肌质构特性的因素 [J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2009, **37**(4): 134-137.]
- [11] Wang Z Z, Fu Y J, Yang L. *et al.* Variations in body color and flesh quality of *Anguilla japonica* populations in different culture models [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2013, **44**(4): 1042-1049. [王志铮, 付英杰, 杨磊, 等. 三种养殖模式下日本鳗鲡(*Anguilla japonica*)养成成品体色和肌肉品质的差异 [J]. 海洋与湖沼, 2013, **44**(4): 1042-1049.]
- [12] Lin W L, Yang X Q, Li L H, *et al.* Research of relationship between texture and sensory evaluation of crisp grass carp [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2013, **29**(1): 1-7. [林婉玲, 杨贤庆, 李来好, 等. 脆肉鲩质构与感官评价的相关性研究 [J]. 现代食品科技, 2013, **29**(1): 1-7.]
- [13] Fu S J, Cao Z D, Peng J L. Effect of feeding and fasting on excess post-exercise oxygen consumption in juvenile southern catfish (*Silurus meridionalis* Chen) [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 2007, **146**(3): 435-439.
- [14] Hicks J W, Bennett A F. Eat and Run: prioritization of oxygen delivery during elevated metabolic states [J]. *Respiratory Physiology & Neurobiology*, 2004, **144**(2/3): 215-224.
- [15] Fu S J, Cao Z D, Xie X J, *et al.* Feeding metabolism and locomotion metabolism in fishes [J]. *Chinese Journal of Zoology*, 2008, **43**(2): 150-159. [付世建, 曹振东, 谢小军, 等. 鱼类摄食代谢与运动代谢研究进展 [J]. 动物学杂志, 2008, **43**(2): 150-159.]
- [16] Oikawa S, Takemori M, Itazawa Y. Relative growth of organs and parts of a marine teleost, the porgy, *Pagrus major*, with special reference to metabolism-size relationships [J]. *Japanese Journal of Ichthyology*, 1992, **39**(3): 243.
- [17] Itazawa Y, Oikawa S. Metabolic rates in excised tissues of carp [J]. *Experientia*, 1983, **39**(2): 160-161.
- [18] Mittler R. Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance [J]. *Trends in Plant Science*, 2002, **7**(9): 405-410.
- [19] Li Y Z, Mu E X, Shentu Y, *et al.* Effects of overwintering on body morphology, serum biochemistry, activity of functional enzymes related to viscera, and physical properties of muscle and skirt of *Trionyx sinensis* in pond culture mode [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2022, **53**(2): 421-429. [李有志, 牟恩镡, 申屠琰, 等. 越冬对池塘专养模式下中华鳖(*Trionyx sinensis*)机体形态、血清生化、脏器相关功能酶活力及肌肉和裙边物性的影响 [J]. 海洋与湖沼, 2022, **53**(2): 421-429.]
- [20] Li H Y, Zhao J, Li H S. Research progress on influencing factors of Na^+ , K^+ -ATPase and Ca^{2+} , Mg^{2+} -ATPase activities [J]. *Modern Journal of Integrated Traditional Chinese and Western Medicine*, 2008, **17**(9): 1449-1450. [李海英, 赵娟, 李海生. Na^+ , K^+ -ATP酶和 Ca^{2+} , Mg^{2+} -ATP酶活性影响因素的研究进展 [J]. 现代中西医结合杂志, 2008, **17**(9): 1449-1450.]
- [21] Jin L H, Bahn J H, Eum W S, *et al.* Transduction of human catalase mediated by an HIV-1 TAT protein basic domain and arginine-rich peptides into mammalian cells [J]. *Free Radical Biology & Medicine*, 2001, **31**(11): 1509-1519.
- [22] Yang C, Liu Z Y, Zhu W D, *et al.* Effects of water temperature on respiration and excretion of *Paa spinosa* tadpoles [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2016, **47**(6): 1233-1240. [杨程, 刘哲宇, 朱卫东, 等. 水温对水产经济动物棘胸蛙(*Paa spinosa*)蝌蚪耗氧率、窒息点和排氮率的影响 [J]. 海洋与湖沼, 2016, **47**(6): 1233-1240.]
- [23] Senge M, Senger H. Enzymic meso-chlorination of chlorophylls using chloroperoxidase [J]. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Bioenergetics*, 1989, **977**(2): 177-186.
- [24] Gawlicka A, Teh S J, Hung S S O, *et al.* Histological and histochemical changes in the digestive tract of white sturgeon larvae during ontogeny [J]. *Fish Physiology and Biochemistry*, 1995, **14**(5): 357-371.
- [25] Baglole C J, Goff G P, Wright G M. Distribution and ontogeny of digestive enzymes in larval yellowtail and winter flounder [J]. *Journal of Fish Biology*, 1998, **53**(4): 767-784.

DIFFERENCES IN DORSAL MUSCLE MORPHOLOGY AND ORGAN PHYSIOLOGY AMONG SUBGROUPS WITH DIFFERENT GROWTH PERFORMANCES WITHIN THE COHORT OF JUVENILE BLACK SEABREAM

RAN Duo-Ying¹, HUANG Lin², ZHANG Li-Jun¹, LIU Zhe-Yu¹, ZHENG Jia-Hao¹,
JIANG Hong-Lei² and WANG Zhi-Zheng¹

(1. College of Fisheries, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China; 2. Ningbo Marine and Fisheries Research Institute, Ningbo 315103, China)

Abstract: This study investigates the differences in dorsal muscle morphology and organ physiology among subgroups with different growth performances within the cohort of juvenile black seabream (*Sparus macrocephalus*). The objective is to uncover the connections between growth performance, metabolic strategies, and feeding mechanisms. This information is crucial for accurately selecting high-quality breeding populations of juvenile black seabream and for scientifically guiding efficient and intensive cultivation. A total of 3000 individuals from the same cohort of juvenile black seabream which cultivated in cage culture by Ningbo Xiangshan Harbor Aquatic Seedling Co, Ltd. in the Xi Hu Harbor area were chosen. Following a 1d fasting period, they were categorized based on body mass into five subgroups: A [body mass (8.2±1.5) g, frequency 5%], B [body mass (5.3±0.9) g, frequency 20.6%], C [body mass (3.8±0.6) g, frequency 48.3%], D [body mass (2.4±0.4) g, frequency 21%], and E [body mass (1.7±0.5) g, frequency 5.1%]. Comprehensive studies were conducted on the differences in oxygen consumption rate, critical oxygen level, and enzyme activity in gill tissues and internal organs based on measurements of dorsal muscle morphology and organ mass ratios. The findings indicate: (1) Subgroups in this study can be distinctly differentiated based on the clustering characteristics of organ ratio traits. (2) Among the traits of dorsal muscle morphology and oxygen consumption rate, only chew resistance and daily oxygen consumption rate showed a monotonic increase with enhanced growth performance. The diurnal rhythm of oxygen consumption for subgroup C was roughly equal during day and night ($P>0.05$), while for other subgroups, nighttime rates exceeded daytime rates ($P<0.05$). (3) The critical oxygen level in water exhibited a stepwise decline as growth performance improved, with only subgroups A and B showing significant differences ($P<0.05$) from subgroup E, following the pattern $E>A\approx B$. (4) Activities of internal organ enzymes such as amylase, protease, AKP, ACP, and ATP displayed a stepwise decline with enhanced growth performance, while SOD, CAT, and POD enzyme activities showed a stepwise increase, and lipase and LHD enzyme activities demonstrated an initial decline followed by an increase. (5) Gill tissue enzyme activities for SOD, POD, Na^+/K^+ -ATPase, and $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ -ATPase all exhibited a stepwise increase with enhanced growth performance, while CAT enzyme activity showed an initial decline followed by an increase. The research provides a scientific foundation for constructing growth performance evaluation systems for black seabream, exploring fast-growing germplasm, and guiding the selection and breeding of fast-growing varieties (strains).

Key words: Growth performance; Oxygen consumption rate; Critical oxygen level; Dorsal muscle morphology; Enzyme activity; Juvenile black seabream