

投喂频率对大口黑鲈生长、消化及摄食代谢的影响^{*}

杨洁^{1,2}, 向中奥^{1,2}, 刘映彤², 李云^{1,2}, 庞旭^{1,2}

(1. 西南大学 西部(重庆)科学城种质创制大科学中心; 2. 西南大学 水产学院, 重庆 400715)

摘要:为考察投喂频率对大口黑鲈(*Micropterus salmoides*)生长、消化和摄食代谢的影响及三者间的关联,在 25 ℃ 条件下,经 1、2 和 3 次·d⁻¹ 不同频率的饱足投喂后测定特定生长率(specific growth rate,SGR)、摄食率(feeding rate,FR)、饲料转化效率(feed efficiency,FE)、胃内容物变化和特殊动力作用(specific dynamic action,SDA)参数。结果显示:在生长性能方面,各组实验鱼在经 28 d 投喂后,体质量和体长与投喂开始时相比均有统计学意义上的增加($p<0.05$);随着投喂频率的增加(2 和 3 次·d⁻¹),SGR 增加了 11%~14%,FR 增加了 16%~18%,FE 无统计学意义上的变化,SGR 与 FR 之间呈统计学意义上的正相关($p<0.05$)。在消化能力方面,随投喂频率的增加(2 和 3 次·d⁻¹),日摄食量增加了 16%~18%,排空时间仅增加了 2~4 h。在摄食代谢方面,大口黑鲈静息代谢率(resting metabolic rate,RMR)、摄食代谢峰值(peak feeding metabolic rate,PMR)和峰值摄食代谢空间(peak feeding metabolic scope,PMS)在各投喂频率组间无统计学意义上的差异;随着投喂频率的增加,PMR 和 PMS 分别增加了约 10%,差异不具有统计学意义;SDA 时间增加了约 43%,SDA 总耗能增加幅度超过 70%,SDA 系数增加了约 45%($p<0.05$)。实验结果说明,对大口黑鲈增加投喂频率使得生长能力增强的主要原因在于日摄食量的增加;增加对大口黑鲈的投喂频率,会使胃内容物排空具有叠加效应;大口黑鲈随日摄食量增加,同化能力会增强。鉴于大口黑鲈的生长性能与它的日摄食量、消化能力和摄食代谢反应等有关,故在养殖过程中每天投喂 2 次且投喂时间间隔约 12 h 较为合适。

关键词:肉食性鱼类;特定生长率;胃排空率;摄食代谢

中图分类号:Q175

文献标志码:A

文章编号:1672-6693(2024)06-0007-09

投喂频率是指在特定时间内对动物进行投喂的次数,通常以“次·d⁻¹”表示;它在水产动物养殖过程是重要的管理策略,一直备受关注^[1-2]。鱼类投喂频率策略通常分为 2 种方式,一是每次都将鱼类投喂至饱足状态;二是在总日粮一定的情况下,对鱼类进行不同频次投喂^[3-4]。前者主要关注鱼类投喂频率与总摄食量的关联及它对生长的影响;后者主要关注饵料和能量利用效益^[5-6]。因此,在鱼类养殖过程中,设定科学合理的投喂频率至关重要,这将直接影响到最终的经济效益及生态效益。

鱼类生长潜能不仅被环境因素所影响,同时还被自身的生理条件所限制^[7]。在食物资源充足的条件下,鱼类的生长受消化和代谢能力的限制^[8]。胃排空率(gastric evacuation rate,GER)是指动物摄食后食物从胃排至肠道的速率,常作为衡量鱼类消化能力的指标^[9]。特殊动力作用(specific dynamic action,SDA)是指动物在摄食后的消化过程中代谢增加的现象,包括所有与营养代谢有关的食物的消化、吸收及生长同化等过程中的能耗^[10]。已有研究表明,鱼类的特定生长率(specific growth rate,SGR)与 GER、SDA 参数存在密切关联^[11]。

大口黑鲈(*Micropterus salmoides*)又名加州鲈,为鲈形目(Perciformes)太阳鱼科(Centrarchidae)黑鲈属(*Micropterus*)的一种淡水鱼类,具有适应性强、生长快、肉质细嫩、无肌间刺等特点^[12]。该鱼种原产于北美,中国于 20 世纪引种并成功进行人工繁殖,现已成为淡水养殖业的重要经济鱼类之一^[13]。目前,相关研究主要集中在该鱼种的养殖技术、鱼病治理、繁殖孵化和生长发育等方面^[14-17],而它不同频率投喂后的消化排空过程及摄食代谢反应还鲜有报道。本研究对大口黑鲈幼鱼进行不同频率(1、2 和 3 次·d⁻¹)的投喂后测定它们的 SGR、摄食率(feeding rate,FR)、饲料转化效率(feed efficiency,FE)、胃内容物变化、SDA 参数等,考察投喂频率对该

^{*} 收稿日期:2024-06-13 修回日期:2024-10-12 网络出版时间:2024-12-30T10:46

资助项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(No.31702020);重庆市自然科学基金面上项目(No.cstc2020jcyj-msxmX0479)

第一作者简介:杨洁,女,研究方向为鱼类生理生态学,E-mail:yangjie22@yeah.net;通信作者:庞旭,男,副教授,博士,E-mail:pangxu9@hotmail.com

网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/50.1165.n.20241227.1558.014

鱼种的生长、消化和摄食代谢的影响及这三者之间的关联,旨在为鱼类营养生理学和水产动物健康养殖提供基础数据和参考资料。

1 材料与方法

1.1 实验鱼及驯化

实验用大口黑鲈幼鱼购自重庆市永川区鱼种场(体质量为 10~30 g,数量为 300 尾),并在实验室内循环水槽中驯养 21 d 以适应养殖环境。每天 9:00 用通威公司生产的肉食性鱼类商业饵料(蛋白、脂肪、糖类和灰分的质量分数分别为 49.0%、5.0%、3.0%和 18.0%,水分质量分数为 1.65%,能值为 13.823 kJ·g⁻¹)饱足投喂 1 次,投喂 1 h 后用虹吸管清理残饵和粪便。驯化期间保持水温为(25±1)℃,水体溶解氧质量浓度在 7 mg·L⁻¹ 以上,氨氮质量浓度在 0.005~0.025 mg·L⁻¹,光照周期为 12 h 光照:12 h 黑暗,每天用同温曝气水进行换水,换水量为驯养水体体积的 1/3 以上。

1.2 生长性能的测定

驯化完成后,随机选择 30 尾规格相似的实验鱼(每投喂频率组 10 尾),测定体质量和体长后转移至养殖单元格(每单元各 1 尾)进行为期 28 d 的养殖生长实验。实验周期中选取颗粒大小一致的饵料(与驯化期间所用饵料相同)进行不同频率投喂(1 次·d⁻¹ 组在每天 09:00 投喂,2 次·d⁻¹ 组在每天 09:00、21:00 投喂,3 次·d⁻¹ 组在每天 09:00、15:00、21:00 进行投喂,每次投喂至饱足),每次投喂 1 h 后清理残饵和粪便并记录摄食量,其余养殖条件与驯化期间保持一致。实验完成后再次测定实验鱼体质量和体长。实验鱼的生长性能参数计算公式如下:

$$V_{\text{SGR}} = ((\ln M_t - \ln M_0) / t) \times 100\%,$$

$$V_{\text{FR}} = (2F_c / ((M_t + M_0) / t)) \times 100\%,$$

$$V_{\text{FE}} = ((M_t - M_0) / F_c) \times 100\%,$$

其中: V_{SGR} 表示 SGR 数值,单位 d⁻¹; V_{FR} 表示 FR 数值,单位 d⁻¹; V_{FE} 表示 FE 数值; M_0 和 M_t 分别表示实验鱼初始和终末体质量数值,单位 g; t 表示实验周期数值,单位 d; F_c 表示实验鱼摄食量数值,单位 g。

1.3 消化能力的测定

选取体质量相似的实验鱼测定体质量后转移至大小为 15 cm×30 cm 的单元格内,在禁食至少 24 h 后进行不同频率的投喂,投喂量根据生长实验的摄食量平均值和投喂时间间隔确定。具体方案为:1 次·d⁻¹ 组进行 1 次投喂,投喂量与日摄食率一致;2 次·d⁻¹ 组进行 2 次投喂,投喂量为日摄食率的 1/2(生长实验中 2 次实际摄食率约为 1:1),2 次投喂间隔时间为 12 h;3 次·d⁻¹ 组进行 3 次投喂,投喂量为日摄食率的 1/3(生长实验中 3 次实际摄食率约为 1:1:1),2 次投喂间隔时间为 6 h。投喂 1 h 后,对完成摄食的实验鱼进行 GER 取样。取样时间分别在首次摄食后的 1,2,4,8,12,16,20 和 24 h,每个实验组的每一时刻点取样 6 尾实验鱼。使用质量浓度为 50 mg·L⁻¹ 的麻醉剂 MS 222 将实验鱼完全麻醉后,解剖取出胃内容物放至烘箱,在 70℃ 下经 48 h 烘干至恒质量^[18]。随后用分析天平称量胃内容物干质量(精确到 0.001 g),然后将干质量转化为投喂饵料所对应的质量。

1.4 摄食代谢的测定

采用流水式呼吸仪测定实验鱼耗氧率作为摄食代谢相关参数^[19]。实验前选择规格相似实验鱼测定体质量和体长,然后转入流水式呼吸仪的呼吸室,待适应约 24 h 后(禁食 24 h 以上),以 1 h 时间间隔测定实验鱼的耗氧率 6 次,取平均值作为实验鱼的静止代谢率(resting metabolic rate, RMR)以衡量它维持能量的消耗。RMR 测定完成后,打开呼吸室的投喂孔,对实验鱼进行定量投喂(投喂量的确定与前文 1.3 节一致)。投喂 1 h 后,对于完成摄食的鱼类进行耗氧率测定,测定时间间隔为 1 h,1 次·d⁻¹ 组测定时长为 24 h,2 和 3 次·d⁻¹ 组测定时长均为 30 h。对于 2 次·d⁻¹ 组和 3 次·d⁻¹ 组实验鱼投喂量和投喂时间与前文 1.3 节一致,投喂方法详见文献[19]。消化过程中最大耗氧率作为摄食代谢峰值(peak feeding metabolism rate, PMR);PMR 与 RMR 两者之差作为峰值摄食代谢空间(peak feeding metabolic space, PMS);超出 RMR 耗氧部分为 SDA 总耗氧,结合氧热当量系数(13.84 J·mg⁻¹)将它转换为 SDA 总耗能^[20];SDA 总耗能所占食物能量的百分比为 SDA 系数。摄食代谢测定过程中,水温始终维持在(25±0.5)℃,溶解氧质量浓度采用美国哈希公司出品的哈希 HQ30d 型溶解氧测定仪测定,实验鱼的耗氧率(单位 mg·kg⁻¹·h⁻¹)的计算公式为:

$$M(O_2)=\Delta m(O_2)\times(v/m),$$

其中: $\Delta m(O_2)$ 为实验呼吸室和对照呼吸室(无鱼)溶解氧质量浓度数值的差值,单位 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; v 为呼吸室的流速数值,单位 $\text{L}\cdot\text{h}^{-1}$; m 为实验鱼体质量数值,单位 kg 。

1.5 数据处理

用 Excel 2021 软件对所有实验数据进行常规计算,用 SPSS 17.0 软件就摄食频率对生长和摄食代谢参数的影响进行单因素方差分析(ANOVA),就摄食频率和取样时间对胃内容物的影响进行双因素方差分析;上述方差分析通过后进行 Duncan 多重比较。采用线性模型和平方根模型对最后一次摄食后剩余胃内容物量(以它的质量占体质量的百分比计)与摄食后时间(单位:h)的关系进行回归分析。数据结果均以“平均值±标准误”形式表示,当 $p<0.05$ 时,上述统计分析结果具有统计学意义。

2 结果

2.1 对生长性能的影响

表 1 显示:各组实验鱼在经过 28 d 投喂后,终末体质量和终末体长相对于初始体质量和初始体长均有统计学意义上的增加($p<0.05$);2 次 $\cdot\text{d}^{-1}$ 组和 3 次 $\cdot\text{d}^{-1}$ 组实验鱼的 SGR 和 FR 均高于 1 次 $\cdot\text{d}^{-1}$ 组的 SGR 和 FR,有关数据差异均具有统计学意义($p<0.05$);各实验组的 FE 无统计学意义上的差异。在所有实验组,SGR 与 FR 间呈统计学意义上的正相关($p<0.001$,图 1a);SGR 与 FE 间和 FR 与 FE 间的相关关系不具有统计学意义(图 1b、c)。

表 1 投喂频率对大口黑鲈生长性能的影响
Tab.1 The effect of feeding frequency on the growth performance of largemouth bass

参数	投喂频率/(次 $\cdot\text{d}^{-1}$)		
	1	2	3
初始体质量/g	19.61±0.84	19.01±0.70	19.83±0.97
终末体质量/g	43.99±2.17 [*]	46.45±1.70 [*]	49.45±2.34 [*]
初始体长/cm	10.03±0.14	9.96±0.17	10.15±0.19
终末体长/cm	12.74±0.18 [*]	13.08±0.18 [*]	13.46±0.26 [*]
SGR/d ⁻¹	2.87%±0.09% ^a	3.19%±0.09% ^b	3.26%±0.13% ^b
FR/d ⁻¹	2.11%±0.06% ^a	2.44%±0.04% ^b	2.50%±0.07% ^b
FE	129.42%±3.07% ^a	122.61%±2.50% ^a	121.78%±1.91% ^a

注:“^{*}”表示终末体质量(或体长)与初始体质量(或体长)的差异具有统计学意义($p<0.05$),不同小写字母表示同一行的数据差异具有统计学意义($p<0.05$)。

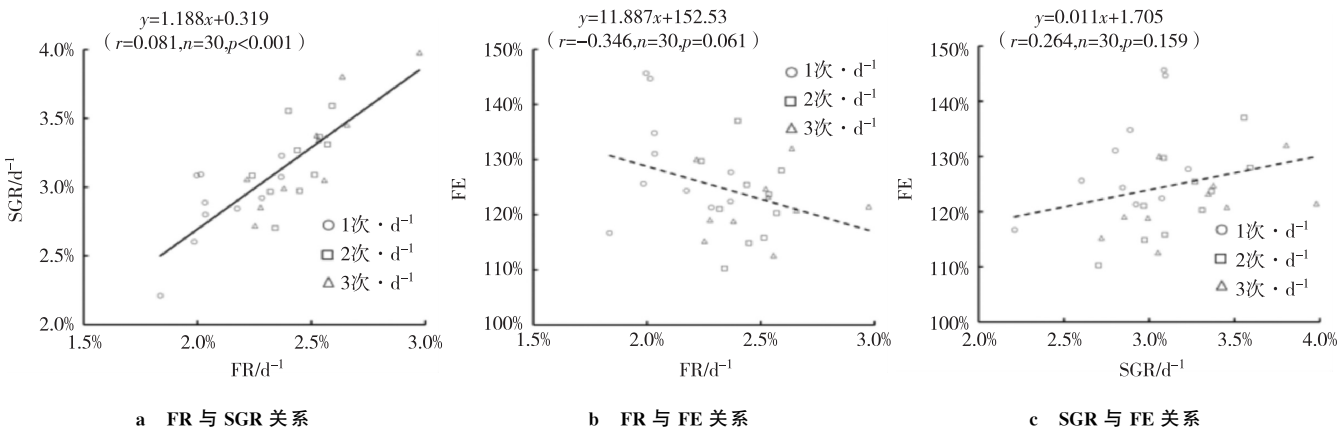


图 1 投喂频率对大口黑鲈生长性能的关系

Fig.1 Relationship between feeding frequency on the growth performance of largemouth bass

2.2 对消化能力的影响

由表 2 可知:投喂频率($F_{2,120}=147.603, p<0.001$)和取样时间($F_{7,120}=286.680, p<0.001$)对剩余胃内容物量的影响具有统计学意义。在 1 次 $\cdot d^{-1}$ 组,随消化时间的延长,剩余胃内容物量减少,其中摄食后 1、4、8、12、16 和 24 h 的组间数据差异均具有统计学意义($p<0.05$);在 2 次 $\cdot d^{-1}$ 组,初次投喂后(1~8 h),剩余胃内容物量随消化时间延长而减少,当再次投喂后(12~24 h),剩余胃内容物量先增加,再随消化时间延长而减少;在 3 次 $\cdot d^{-1}$ 组,初次投喂后(1~4 h),剩余胃内容物量随消化时间延长而减少,再次投喂后(8 h),剩余胃内容物增加,当第 3 次投喂后(12~24 h),剩余胃内容物量先增加,再随消化时间延长而减少。

在初次摄食后 1~4 h,1 次 $\cdot d^{-1}$ 组剩余胃内容物量高于 2 次 $\cdot d^{-1}$ 组剩余胃内容物量,2 次 $\cdot d^{-1}$ 组剩余胃内容物量高于 3 次 $\cdot d^{-1}$ 组剩余胃内容物量;在初次摄食后 8 h,1 次 $\cdot d^{-1}$ 组剩余胃内容物量高于 2 次 $\cdot d^{-1}$ 组和 3 次 $\cdot d^{-1}$ 组剩余胃内容物量;在初次摄食后 12 h,1 次 $\cdot d^{-1}$ 组剩余胃内容物量低于 2 次 $\cdot d^{-1}$ 组和 3 次 $\cdot d^{-1}$ 组剩余胃内容物量;在初次摄食后 16 h,3 次 $\cdot d^{-1}$ 组剩余胃内容物量高于 1 次 $\cdot d^{-1}$ 组而低于 2 次 $\cdot d^{-1}$ 组剩余胃内容物量;在初次摄食后 20 h,1 次 $\cdot d^{-1}$ 组剩余胃内容物量低于 2 次 $\cdot d^{-1}$ 组剩余胃内容物量;在初次摄食后 24 h,2 次 $\cdot d^{-1}$ 组剩余胃内容物量高于 1 次 $\cdot d^{-1}$ 组和 3 次 $\cdot d^{-1}$ 组剩余胃内容物量(表 2)。

表 2 投喂频率对大口黑鲈摄食后排空率的影响

Tab. 2 The effect of feeding frequency on the empty space rate of largemouth bass after feeding

投喂频率/(次 $\cdot d^{-1}$)	参数	摄食后时间/h			
		1	2	4	8
1	体质量/g	21.51 $\pm$ 2.21	24.03 $\pm$ 3.91	21.55 $\pm$ 2.67	18.41 $\pm$ 1.04
	摄食水平	2.07% $\pm$ 0.00%	2.07% $\pm$ 0.01%	2.06% $\pm$ 0.01%	2.07% $\pm$ 0.00%
	剩余胃内容物量	1.96% $\pm$ 0.02% ^{a,A}	1.94% $\pm$ 0.02% ^{ab,A}	1.78% $\pm$ 0.03% ^{b,A}	1.23% $\pm$ 0.14% ^{c,A}
2	体质量/g	20.04 $\pm$ 0.70	19.42 $\pm$ 0.84	22.03 $\pm$ 1.03	18.28 $\pm$ 1.06
	摄食水平	1.19% $\pm$ 0.00%	1.19% $\pm$ 0.00%	1.19% $\pm$ 0.00%	1.19% $\pm$ 0.00%
	剩余胃内容物量	1.12% $\pm$ 0.02% ^{a,B}	1.03% $\pm$ 0.01% ^{a,B}	0.87% $\pm$ 0.04% ^{b,B}	0.66% $\pm$ 0.01% ^{c,B}
3	体质量/g	21.50 $\pm$ 0.93	19.17 $\pm$ 1.54	19.47 $\pm$ 0.97	18.95 $\pm$ 1.43
	摄食水平	0.82% $\pm$ 0.00%	0.82% $\pm$ 0.00	0.82% $\pm$ 0.01%	1.63% $\pm$ 0.00%
	剩余胃内容物量	0.76% $\pm$ 0.01% ^{ab,C}	0.69% $\pm$ 0.01% ^{b,C}	0.45% $\pm$ 0.03% ^{c,C}	0.85% $\pm$ 0.04% ^{a,B}
投喂频率/(次 $\cdot d^{-1}$)	参数	摄食后时间/h			
		12	16	20	24
1	体质量/g	20.54 $\pm$ 1.97	20.49 $\pm$ 1.09	21.89 $\pm$ 1.92	21.37 $\pm$ 1.25
	摄食水平	2.07% $\pm$ 0.01%	2.07% $\pm$ 0.00%	2.07% $\pm$ 0.00%	2.07% $\pm$ 0.00%
	剩余胃内容物量	0.75% $\pm$ 0.07% ^{d,A}	0.23% $\pm$ 0.02% ^{e,A}	0.14% $\pm$ 0.03% ^{ef,A}	0.00% $\pm$ 0.00% ^{f,A}
2	体质量/g	20.57 $\pm$ 1.22	20.28 $\pm$ 0.94	20.17 $\pm$ 1.64	19.65 $\pm$ 0.96
	摄食水平	2.37% $\pm$ 0.03%	2.38% $\pm$ 0.00%	2.38% $\pm$ 0.00%	2.38% $\pm$ 0.00%
	剩余胃内容物量	1.35% $\pm$ 0.01% ^{d,B}	0.75% $\pm$ 0.04% ^{c,B}	0.35% $\pm$ 0.06% ^{b,B}	0.26% $\pm$ 0.08% ^{e,B}
3	体质量/g	18.57 $\pm$ 2.42	21.95 $\pm$ 2.11	20.22 $\pm$ 1.45	21.23 $\pm$ 1.08
	摄食水平	2.46% $\pm$ 0.01%	2.45% $\pm$ 0.00%	2.45% $\pm$ 0.00%	2.45% $\pm$ 0.00%
	剩余胃内容物量	1.27% $\pm$ 0.02% ^{d,B}	0.50% $\pm$ 0.04% ^{c,C}	0.25% $\pm$ 0.07% ^{e,AB}	0.08% $\pm$ 0.04% ^{f,A}

注:摄食水平和剩余胃内容物量以摄食量和剩余胃内容物质量分别占体质量的百分比计,下同;不同小写字母表示同一行数据差异具有统计学意义($p<0.05$),不同大写字母表示同一列数据差异具有统计学意义($p<0.05$)。

各实验组最后1次投喂后(1次·d⁻¹组,1~24 h;2次·d⁻¹组和3次·d⁻¹组,12~24 h)剩余胃内容物与时间的线性模型回归方程分别为 $y = -0.095x + 2.040$ ($r^2 = 0.934, n = 48, p < 0.001$)、 $y = -0.092x + 2.328$ ($r^2 = 0.844, n = 24, p < 0.001$)和 $y = -0.096x + 2.245$ ($r^2 = 0.8427, n = 24, p < 0.001$);平方根模型回归方程分别为 $y^{0.5} = -0.055x + 1.505$ ($r^2 = 0.957, n = 48, p < 0.001$)、 $y^{0.5} = -0.063x + 1.899$ ($r^2 = 0.902, n = 24, p < 0.001$)和 $y^{0.5} = -0.084x + 2.124$ ($r^2 = 0.934, n = 24, p < 0.001$) (图2)。

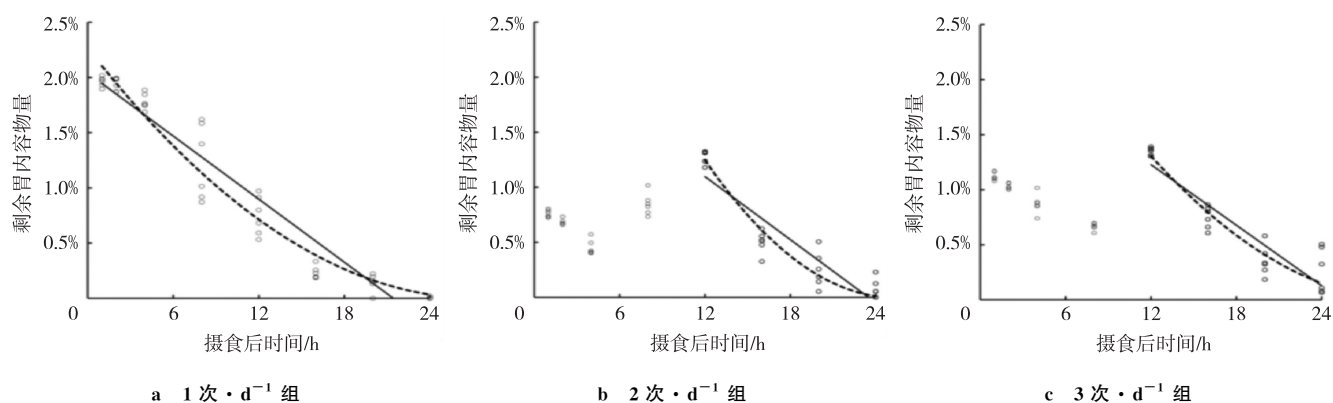


图2 不同投喂频率大口黑鲈胃排空曲线的2种数学模型拟合

Fig. 2 Two mathematical models fitting the gastric emptying curves of largemouth bass with different feeding frequencies

2.3 对摄食代谢的影响

在投喂后,各实验组实验鱼代谢率与摄食前相比均有统计学意义上的增加($p < 0.05$),2次·d⁻¹组和3次·d⁻¹组分别呈现双峰和三峰的代谢率变化率曲线,随后代谢率均逐步回落到摄食前水平(图3)。实验鱼RMR、PMR和PMS在各实验组间无统计学意义上的差异;1次·d⁻¹组的SDA总耗能和SDA系数低于2次·d⁻¹组和3次·d⁻¹组的SDA总耗能和SDA系数,差异具有统计学意义($p < 0.05$),SDA总耗能和SDA系数在2次·d⁻¹组和3次·d⁻¹组间无统计学意义上的差异(表3)。

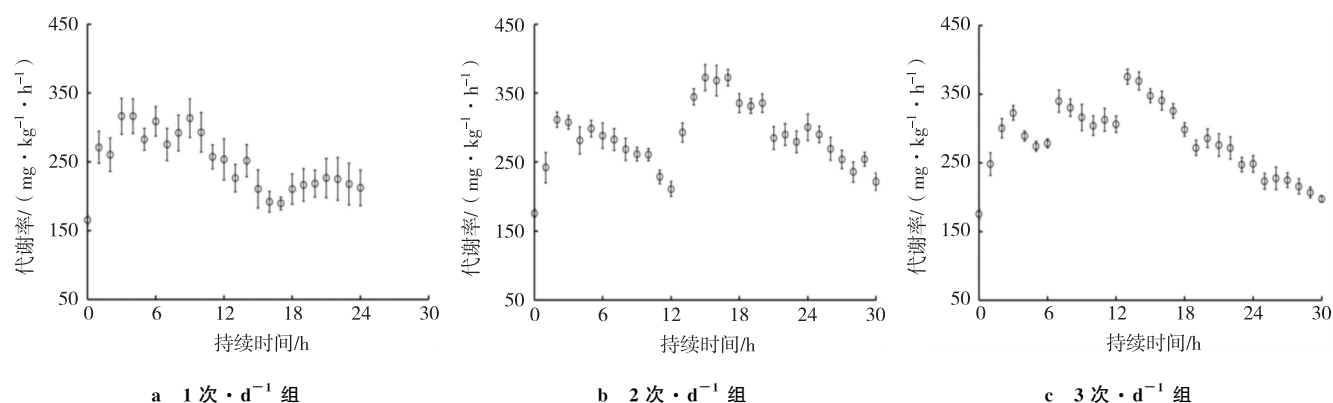


图3 不同投喂频率下大口黑鲈摄食代谢率变化

Fig. 3 Changes of postprandial metabolic rate in largemouth bass at different feeding frequencies

3 讨论

投喂频率是水产动物养殖管理的主要环节之一,也是影响水产动物摄食和饲料消化利用率的重要因素^[21]。已有研究发现,增加投喂频率会使鱼类生长能力增强,如南方鲇(*Silurus meridionalis*)、团头鲂(*Megalobrama amblycephala*)、瓦氏黄颡鱼(*Pelteobagrus vachelli*)经3次·d⁻¹投喂的SGR比1次·d⁻¹投喂的SGR分别增加了21%,17%和23%^[22-24]。本研究发现,大口黑鲈经2和3次·d⁻¹投喂的SGR比经1次·d⁻¹投喂的SGR分别增加了11%和14%;大口黑鲈的SGR与FR具有统计学意义上的正相关($p < 0.05$),这与已有研究结果一致,

表明增加投喂频率使鱼类生长能力增强的主要原因在于日摄食量的增加。此外,当投喂频率增加到一定程度,鱼类的 FR 和 SGR 不再增加,如红鳍东方鲀(*Takifugu rubripes*)经 2~4 次·d⁻¹ 投喂后 SGR、FR 和 FE 无统计学意义上的变化^[25]。

表 3 投喂频率对大口黑鲈摄食代谢的影响
Tab.3 The effect of feeding frequency on feeding metabolism of largemouth bass

参数	投喂频率/(次·d ⁻¹)		
	1	2	3
体质量/g	18.33±0.79	19.50±1.16	20.20±1.08
体长/cm	9.89±0.15	10.10±0.15	10.03±0.20
摄食水平	2.07%±0.00%	2.38%±0.00%	2.45%±0.00%
能量摄食率/(kJ·kg ⁻¹)	285.98±0.15	328.39±0.04	339.05±0.09
RMR/(mg·kg ⁻¹ ·h ⁻¹)	165.41±6.57	176.02±5.89	175.69±7.30
PMR/(mg·kg ⁻¹ ·h ⁻¹)	357.91±23.91	386.66±17.78	390.21±8.62
PMS/(mg·kg ⁻¹ ·h ⁻¹)	192.50±23.50	210.64±15.77	214.52±8.62
持续时间/h	21	30	30
SDA 总耗能/(kJ·kg ⁻¹)	26.39±4.64 ^a	46.95±2.49 ^b	45.78±2.54 ^b
SDA 系数	9.23%±1.62% ^a	14.30%±0.76% ^b	13.50%±0.75% ^b

注:不同小写字母表示同一行数据差异具有统计学意义($p<0.05$)。

影响鱼类生长能力的因素众多,当食物资源丰富的情况下,鱼类的生长能力可能受到消化能力和代谢水平的限制^[8]。已有研究表明,肉食性鱼类胃的排空程度与食欲的恢复密切相关,如虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)胃内容物排出超 50%后,食欲的恢复也超过 50%^[26]。研究发现,大口黑鲈经 1 次·d⁻¹ 投喂后,胃内容物排出 50%的时间大约 10 h,不能维持 24 h,表明 1 次·d⁻¹ 投喂并没有激发出大口黑鲈的全部食欲和消化潜能,因此可以通过增加投喂频率来增加日摄食量以激发潜能。鱼类 GER 的数学模型可在一定程度上确定投喂时间间隔,本研究发现,大口黑鲈摄食后 GER 平方根模型要优于线性模型(图 3),与已有的研究结果一致^[27]。这表明鱼类摄食后,对食物的消化并非等速而是变速的。研究发现,1 次·d⁻¹ 组、2 次·d⁻¹ 组和 3 次·d⁻¹ 组大口黑鲈分别在初次摄食约 21、25 和 23 h 后排空完成(通过线性回归方程求得,图 2);增加投喂频率(2 和 3 次·d⁻¹)后该鱼种的日摄食量增加了 16%~18%,大口黑鲈的排空时间仅增加了 2~4 h。因此,当鱼类摄食后消化到一定程度进行再次投喂,排空率有一定叠加效应,进而增加鱼类的日摄食量。此外,大口黑鲈经 1~3 次·d⁻¹ 投喂,在初次投喂后 24 h 消化均基本完成(2 次·d⁻¹ 组和 3 次·d⁻¹ 组分别尚有 1.1%和 0.3%日摄食量未完成消化);然而在生长实验中 2 次·d⁻¹ 组的 2 次摄食量分别为 47%和 53%,在 3 次·d⁻¹ 组中 3 次摄食量分别为 37%、35%和 28%,可见单次摄食量基本一致(最大差值不超过 10%)。这些结果表明,鱼类单次摄食量(或食欲)除了与剩余胃内容物有关,还受到其他因素的限制。

鱼类 SDA 包括吞咽、消化、吸收、转运和合成等耗能过程,其中主要包括将食物转化成可吸收小分子的消化部分和将所吸收的小分子合成大分子物质的同化部分^[19]。研究发现,各实验组投喂前的 RMR 无统计学意义上的差异;1 次·d⁻¹ 组、2 次·d⁻¹ 组和 3 次·d⁻¹ 组大口黑鲈在初次摄食 3 h 后(因 2 次·d⁻¹ 组的第 2 次投喂时间点为 6 h,3 组初次摄食后 3 h 为 6 h 前峰值),代谢率分别为 316、307 和 322 mg·kg⁻¹·h⁻¹(图 3),三者差异不具有统计学意义,这可能与大口黑鲈 SDA 消化耗能部分与摄食量多少关系不大有关,因为消化酶、消化液分泌属于单次能量投入^[28]。增加投喂频率(2 和 3 次·d⁻¹),大口黑鲈的 PMR 和 PMS 也相应增加约 10%(差异不具有统计学意义);日摄食量增加 16%~18%,SDA 时间增加约 43%,而 SDA 总耗能增加超过 70%,同时 SDA 系数增加约 45%(表 3)。已有研究发现,一些鱼类 SDA 总耗能与其摄食水平呈正比关系,如南方鲇^[29]、中华倒刺鲃(*Spinibarbus sinensis*)^[30];而另一些鱼类呈非线性关系,如鲇(*Silurus asotus Linnaeus*)^[31]、异育银鲫(*Carassius auratus gibelio*)^[32]。鱼类生长具有复杂的能量学过程,主要取决于能量摄入和消耗这 2 部分之差。

在本研究,增加大口黑鲈投喂频率,SGR亦增加,在此过程对物质的合成也相应增加,结果是SDA同化过程耗能不可避免亦会增加^[33]。

综合生长性能和养殖成本分析,在大口黑鲈养殖生产过程中每天投喂2次且投喂时间间隔约12h较为合适。大口黑鲈生长能力主要取决于日摄食量的多少,此外也与该鱼种的消化能力、摄食代谢反应等内在生理因素有关。

参考文献:

- [1] POUOMOGNE V, OMBREDANE D. Effect of feeding frequency on the growth of tilapia (*Oreochromis niloticus*) in earthen ponds[J]. Tropicultura, 2001, 19(3): 147-150.
- [2] BISWAS G, KUMAR P, MANDAL B, et al. Effects of feeding frequency on growth, survival, body composition and size variation in long whiskers catfish, *Mystus gulio* (Hamilton, 1822) fry reared in net cage system[J]. Regional Studies in Marine Science, 2023, 61: 102851.
- [3] 罗涵, 刘昊昆, 杨云霞, 等. 不同投喂频率下复合非粮蛋白源替代鱼粉饲料对大口黑鲈生长性能和健康的影响[J]. 水生生物学报, 2024, 48(1): 63-76.
LUO H, LIU H K, YANG Y X, et al. Different dietary replacements of fishmeal by non-food proteins blend on growth performance, health of largemouth bass (*Micropterus salmoides*) at different feeding frequencies[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2024, 48(1): 63-76.
- [4] 张佳, 葛晓雨, 陈松猛, 等. 投喂频率对红鳍东方鲀生长和行为的影响[J]. 水生生物学报, 2024, 48(1): 77-85.
ZHANG J, GE X Y, CHEN S M, et al. Feeding frequency on the growth and behavior of *Takifugu rubripes* [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2024, 48(1): 77-85.
- [5] RAHMAN H M, ALAM A M, FLURA, et al. Effects of different feeding frequencies on growth performance and feed conversion ratio (FCR) of Tilapia, *Oreochromis niloticus* [J]. Asian Journal of Fisheries and Aquatic Research, 2023, 23(6): 49-57.
- [6] QUIRÓS-POZO R, MOYANO F J, BAINOUR K, et al. Evaluation of the effects of two different feeding frequencies on the digestive biochemistry of two mullet species (*Chelon labrosus* and *Liza aurata*) [J]. Animals, 2023, 13(2): 287.
- [7] XIE Y X, YANG X M, KANEKO G, et al. Effects of different stocking densities and feeding frequencies on growth, physiological and biochemical indexes, and intestinal microflora of largemouth bass (*Micropterus salmoides*) under land-based round pond [J]. Aquaculture, 2024, 580(2): 740385.
- [8] 管敏, 张德志, 饶军, 等. 饱食投喂频率对子二代中华鲟稚鱼生长及胃肠排空的影响[J]. 淡水渔业, 2019, 49(4): 90-97.
GUAN M, ZHANG D Z, RAO J, et al. Effects of satiation feeding frequency on growth and gastrointestinal evacuation characteristic of juvenile F₂ Chinese sturgeon [J]. Freshwater Fisheries, 2019, 49(4): 90-97.
- [9] 张波, 孙耀, 唐启升. 黑鲷的胃排空率[J]. 应用生态学报, 2000, 11(2): 287-289.
ZHANG B, SUN Y, TANG Q S. Gastric evacuation rate of black sea bream (*Sparus macrocephalus*) [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2000, 11(2): 287-289.
- [10] SECOR S M. Specific dynamic action: a review of the postprandial metabolic response [J]. Journal of Comparative Physiology B, 2009, 179(1): 1-56.
- [11] 母昌考, 崔雪, 王洪飞, 等. 鱼类能量代谢的研究[J]. 饲料工业, 2006, 27(22): 42-45.
MU C K, CUI X, WANG H F, et al. Study on energy metabolism of fish [J]. Feed Indust, 2006, 27(22): 42-45.
- [12] BROWN T G, RUNCIMAN B, POLLARD S, et al. Biological synopsis of largemouth bass (*Micropterus salmoides*) [J]. Lake, 2002, 31(11): 1763-1769.
- [13] HUSSEIN G H G, CHEN M, QI P p, et al. Aquaculture industry development, annual price analysis and out-of-season spawning in largemouth bass *Micropterus salmoides* [J]. Aquaculture, 2020, 519: 734901.
- [14] 郭海燕, 蒋伟, 刘德露, 等. 大口黑鲈高位池养殖技术[J]. 科学养鱼, 2023(10): 46-47.
GUO H Y, JIANG W, LIU D L, et al. High position pond aquaculture technology for largemouth bass (*Micropterus salmoides*) [J]. Scientific Fish Farming, 2023(10): 46-47.
- [15] YANG Q, TU Y Y, ZHANG N, et al. Co-infections of *Aeromonas dhakensis* and *Chryseobacterium indologenes* in largemouth bass (*Micropterus salmoides*) [J]. Aquaculture, 2024, 579: 740259.

- [16] SHARMA A, SEMMENS K, GOMELSKY B. Evaluation of hormonal agents for artificial propagation of largemouth bass[J]. North American Journal of Aquaculture, 2021, 83(4): 390-401.
- [17] LIU Q Q, XIE R, DENG X, et al. Effects of dietary starch and metformin levels on the growth performance, body composition, hepatic glycolipid metabolism, and liver histology of juvenile largemouth bass *Micropterus salmoides* [J]. Aquaculture, 2023, 573: 739582.
- [18] PANG X, TANG G, SUN H, et al. Effect of feeding different diets on postprandial metabolic response, digestive capacity and growth performance in juvenile southern catfish (*Silurus meridionalis*) [J]. Aquaculture Reports, 2022, 27: 101413.
- [19] FU S J, XIE X J, CAO Z D. Effect of feeding level and feeding frequency on specific dynamic action in *Silurus meridionalis* [J]. Journal of Fish Biology, 2005, 67(1): 171-181.
- [20] GUINEA J, FERNANDEZ F. Effect of feeding frequency, feeding level and temperature on energy metabolism in *Sparus aurata* [J]. Aquaculture, 1997, 148(2/3): 125-142.
- [21] 李卓钦, 刘文斌, 田红艳, 等. 不同饲料料型及投喂频率对斑点叉尾鮰幼鱼生长及肌肉品质的影响[J]. 中国水产科学, 2018, 25(6): 1260-1270.
- LI Z Q, LIU W B, TIAN H Y, et al. Effects of different feed types and feeding frequencies on growth and muscle quality of juvenile channel catfish (*Ictalurus punctatus*) [J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2018, 25(6): 1260-1270.
- [22] 何利君, 谢小军, 艾庆辉. 饲喂频率对南方鲇的摄食率、生长和饲料转化效率的影响[J]. 水生生物学报, 2003, 27(4): 434-436.
- HE L J, XIE X J, AI Q H. Effects of feeding frequency on feeding rate, growth and feed conversion efficiency for the southern catfish, *Silurus meridionalis* [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2003, 27(4): 434-436.
- [23] 林艳, 缪凌鸿, 戈贤平, 等. 投喂频率对团头鲂幼鱼生长性能、肌肉品质和血浆生化指标的影响[J]. 动物营养学报, 2015, 27(9): 2749-2756.
- LIN Y, MIAO L H, GE X P, et al. Effects of feeding frequency on growth performance, muscle quality and plasma biochemical indices of *Megalobrama amblycephala* juvenile [J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2015, 27(9): 2749-2756.
- [24] 覃志彪, 赵海洋, 赵华林, 等. 投喂频率对瓦氏黄颡鱼 (*Pelteobagrus vachelli*) 幼鱼胃排空、生长效益及体组成影响[J]. 海洋与湖沼, 2011, 42(4): 506-511.
- QIN Z B, ZHAO H X, ZHAO H L, et al. Effects of feeding frequency on gastric evacuation, growth performance and body composition of juvenile darkbarbel catfish (*Pelteobagrus vachelli* Richardson) [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2011, 42(4): 506-511.
- [25] 卫育良, 王建国, 徐后国, 等. 红鳍东方鲀幼鱼适宜投喂频率和投喂水平的研究[J]. 动物营养学报, 2021, 33(3): 1755-1765.
- WEI Y L, WANG J X, XU H G, et al. Study on optimum feeding frequency and feeding level of juvenile *Taki fugu rubripes* [J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2021, 33(3): 1755-1765.
- [26] GROVE D J, LOIZIDES L G, NOTT J. Satiation amount, frequency of feeding and gastric emptying rate in *Salmo gairdneri* [J]. Journal of Fish Biology, 1978, 12(4): 507-516.
- [27] 李明月, 高云红, 万金铭, 等. 黄条鲮幼鱼胃排空特征、消化酶活性及摄食调控基因表达[J]. 水产学报, 2022, 46(6): 906-916.
- LI M Y, GAO Y H, WAN J M, et al. Gastric evacuation characteristics, digestive enzyme activity and appetite-related genes expression in juvenile yellowtail kingfish (*Seriola aureovittata*) [J]. Journal of Fisheries of China, 2022, 46(6): 906-916.
- [28] CAHU C, RONNESTAD I, GRANGIER V, et al. Expression and activities of pancreatic enzymes in developing sea bass larvae (*Dicentrarchus labrax*) in relation to intact and hydrolyzed dietary protein; involvement of cholecystokinin [J]. Aquaculture, 2004, 238(1/2/3/4): 295-308.
- [29] 谢小军, 孙儒泳. 南方鲇的日总代谢和特殊动力作用的能量消耗[J]. 水生生物学报, 1992, 16(3): 200-207.
- XIE X J, SUN R Y. The daily total metabolism and specific dynamic action in the Southern catfish (*Silurus meridionalis*) [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 1992, 16(3): 200-207.
- [30] 蒲德永, 庞旭, 刘小红, 等. 不同体质量中华倒刺鲃的静止代谢率和生长性能[J]. 水产学报, 2021, 45(4): 515-521.
- PU D Y, PANG X, LIU X H, et al. Resting metabolic rate and growth performance in Qingbo (*Spinibarbus sinensis*) with different body weight [J]. Journal of Fisheries of China, 2021, 45(4): 515-521.
- [31] 杨振才, 谢小军, 孙儒泳. 日粮水平对鲇鱼日总代谢、特殊动力作用和活动代谢的影响[J]. 水生生物学报, 1996, 20(4): 333-339.
- YANG Z C, XIE X J, SUN R Y. Effects of ration level on the daily total metabolism, specific dynamic action and activity metabolism of the oriental sheatfish (*Silurus asotus* L.) [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 1996, 20(4): 333-339.

- [32] 杨严鸥,崔奕波,熊邦喜,等. 建鲤和异育银鲫摄食不同质量饲料时的氮收支和能量收支比较[J]. 水生生物学报,2003,27(6): 572-579.
- YANG Y O, CUI Y B, XIONG B X, et al. Comparative studie on nitrogen budget and energy budget of jian carp (*Cyprinus carpio* var. *jian*) and gibel carp (*Carassius auratus gibelio*) fed diets with different qualities[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2003,27(6):572-579.
- [33] PANG X, CAO Z D, PENG J L, et al. The effects of feeding on the swimming performance and metabolic response of juvenile southern catfish, *Silurus meridionalis*, acclimated at different temperatures[J]. Comparative Biochemistry and Physiology, Part A: Molecular & Integrative Physiology, 2009, 155(2):253-258.

Physiological Ecology and Ethology of Fishes

Effects of Feeding Frequency on Growth, Digestion and Feeding Metabolism of Largemouth Bass (*Micropterus salmoides*)

YANG Jie^{1,2}, XIANG Shenao^{1,2}, LIU Yingtong², LI Yun^{1,2}, PANG Xu^{1,2}

(1. Integrative Science Center of Germplasm Creation in Western China (CHONGQING) Science City & Southwest University; 2. College of Fisheries, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: In order to investigate the effects and relationship of feeding frequency on growth, digestive capacity and ingestion metabolism of largemouth bass (*Micropterus salmoides*). The specific growth rate (SGR), feeding rate (FR), feed efficiency (FE), changes in stomach contents and special dynamic action (SDA) were measured after feeding at different frequencies (1 time per day, 2 times per day and 3 times per day) at 25 °C. The results showed that the end body weight and body length of fish in each group increased significantly after feeding for 28 days. With the increase of feeding frequency (2 times per day and 3 times per day), SGR increased by 11%~14%, FR increased by 16%~18%, and FE did not change significantly. There was a significant positive correlation between SGR and FR ($p < 0.05$). The results showed that the growth ability of largemouth bass was enhanced by increasing feeding frequency mainly due to the increase of daily feed intake. With the increase of feeding frequency (2 times per day and 3 times per day), the daily food intake increased by 16%~18%, and the emptying time only increased by 2~4 h. The results indicated that increasing the feeding frequency of largemouth bass had a superposition effect on gastric contents emptying. The results showed that there were no significant differences in resting metabolic rate (RMR), peak feeding metabolic rate (PMR) and peak feeding metabolic scope (PMS) among different feeding frequency groups. With the increase of feeding frequency, PMR and PMS increased by about 10% respectively (the increase was not significant). The SDA duration increased by about 43%, the total SDA energy consumption increased by more than 70%, and the SDA coefficient increased by about 45% ($p < 0.05$). The results indicated that the assimilation ability of largemouth bass was enhanced with the increase of daily food intake. Therefore, based on the growth performance of largemouth bass, it is appropriate to feed twice a day during the breeding process, with a feeding interval of about 12 h. These are related to the daily intake, digestive capacity and metabolic reaction of food intake.

Keywords: carnivorous fish; specific growth rate; gastric evacuation rate; feeding metabolism

(责任编辑 黄 颖)