

# 南方鲇(*Silurus meridionalis*)幼鱼日粮中适宜常量 营养素(蛋白质、脂肪和碳水化合物)需求量研究\*

冯 健 彭 淇 吴 彬 陈 斌 梁品恒

(广西大学海洋研究中心 南宁 530004)

**提要** 采用混合试验中的 Cornell 均匀设计法研究了初始重为(2.0±0.0)g 的南方鲇(*Silurus meridionalis*)幼鱼日粮中常量营养素(蛋白质、脂肪和碳水化合物)的适宜需求量。日粮中蛋白质、脂肪和碳水化合物梯度变化范围分别为 33%—51%、3%—18%和 24%—33%，试验周期为 40d。试验结果表明，试验日粮中 3 种常量营养素含量对南方鲇幼鱼成活率没有显著影响( $P>0.05$ )。当日粮蛋白质水平 45%时，其特定生长率随着日粮蛋白质水平上升而增加。当日粮脂肪水平 9%时，其特定生长率随着日粮脂肪水平上升而增加；但当日粮中脂肪含量 12%时，鱼体和肝脏脂肪含量显著上升，肝细胞脂肪变性明显。33%碳水化合物日粮组鱼特定生长率较 24%、27%和 30%组鱼显著降低，同时鱼体和肝脏糖原含量显著增加( $P<0.05$ )。试验表明，南方鲇幼鱼日粮蛋白质、脂肪和碳水化合物 3 种常量营养素的适宜需求量分别为 45%、9%和 30%。日粮总能约为 19.0kJ/g。

**关键词** 南方鲇; Cornell 方法; 常量营养素; 蛋白质; 脂肪; 碳水化合物

**中图分类号** S963.73

混合试验(Experiments with mixture)是 20 世纪 50 年代末由 Scheffe 首先提出，针对多个相互影响因子进行优化的格子设计，这一设计奠定混料试验设计的理论基础(Scheffe, 1958)。之后，世界各国的统计学家们根据现实需要提出了多种类型的混料回归模型，并针对各自的试验设计区域制定了不同标准的最优准则，总结出各种混料试验的设计方案和数据分析计算方法(关颖男, 1990; Zhang, 2005)。Cornell 均匀设计法是其中著名的方法之一，它是一种在设定的变化范围内，对 3 个具有相关关系的变量进行同时、连续、系统变化研究的随机优化数学模型，在工程学中得到了广泛的应用(Cornell, 1990)。在水产营养研究中，它满足了蛋白质、脂肪和碳水化合物这 3 种常量营养素的特性，通过一次试验就可以得到养殖鱼类适宜的日粮蛋白质、脂肪和碳水化合物适宜需要量。但目前为止，国内外水产日粮中 3 种常量营养素需要量研究中只有个别学者与作者应用 Cornell 方法的相

关报道(Hamre, 2003; 黄钧等, 2009; 宁毅等, 2012; 陈斌等, 2013)。

我国作为世界上最大的水产养殖国，本土经济鱼类品种养殖在我国水产养殖业中具有重要作用。南方鲇(*Silurus meridionalis*)是我国重要的本土经济鱼类之一，主要生活在长江流域，同时也是我国南方重要的水产养殖品种之一。了解本土养殖鱼类日粮营养物质适宜需要量是我国鱼类营养研究的重要方向之一，西南大学谢小军教授团队已经对南方鲇幼鱼日粮中的常量营养素(蛋白质、脂肪和碳水化合物)的适宜需要量采用传统曲线法和正交法进行了研究(张文兵等, 2000, 2001; 付世建等, 2005; 罗毅平等, 2009)。本试验研究了南方鲇幼鱼日粮中的常量营养素的适宜需要量，目的为比较 Cornell 法与传统曲线法和正交法的试验结果，了解南方鲇幼鱼日粮中适宜的常量营养素需要量及为人工配合饲料的研究提供相关理论依据，进而探索在鱼类常量营养素需要

\* 广西科技厅攻关项目资助, 122201-3 号。冯健, 教授, 德国慕尼黑大学博士(VMD), E-mail: fengjian08@163.com

收稿日期: 2012-11-12, 收修改稿日期: 2013-02-21

量研究中利用 Cornell 方法的可行性。

### 1 材料与方 法

#### 1.1 试验日粮设计

本试验设计按照 Cornell 均匀设计法, 参照前人的研究结果, 设定日粮中蛋白质、脂肪和碳水化合物这 3 种常量营养素的变化范围(Cornell, 1990; 张文兵等, 2000, 2001; 付世建等, 2005; 罗毅平等, 2009)。日粮中蛋白质、脂肪和碳水化合物梯度变化范围分别为 33%—51%、3%—18%和 24%—33%。在设定变化范围内, 日粮中蛋白质、脂肪和碳水化合物呈现 3% 的连续、系统的变化。试验共设计 20 种试验日粮组, 每组设 3 个平行。其试验日粮设计见图 1。

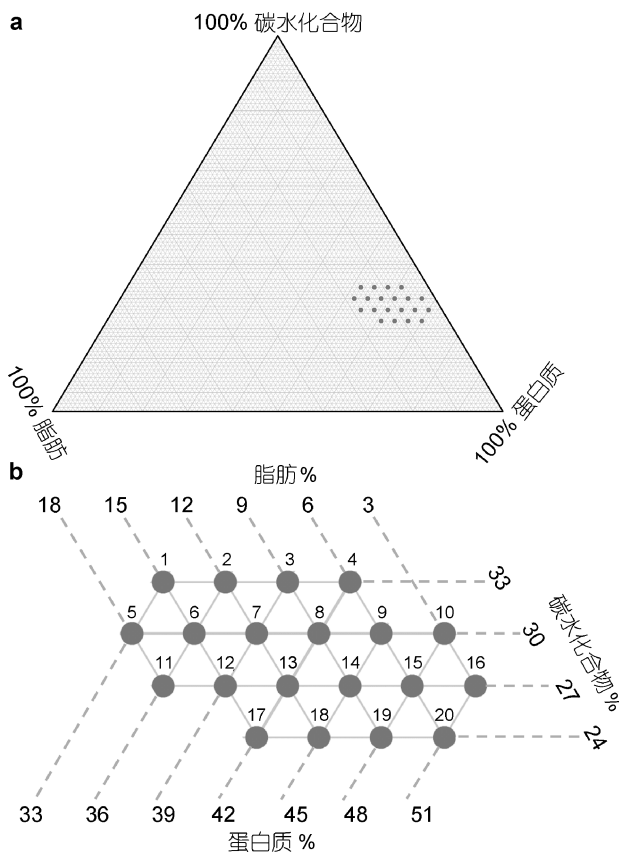


图 1 试验设计

Fig.1 Experiment design

a. 常规营养素组成设计变化趋势; b. 20 组日粮组成情况, 其组成由蛋白质、脂肪和碳水化合物的交叉点所示

日粮中蛋白质原料主要为白鱼粉, 脂类原料主要为玉米油和鲱鱼油(2:1 比例), 碳水化合物原料为小麦淀粉, 维生素和矿物质按照高于 NRC 标准中斑点叉尾鲷推荐量的 50% 添加(NRC, 1993)。试验日粮中

各原料的水分、蛋白质、脂肪、灰分和碳水化合物实测值见表 1, 各试验组营养成分理论和实测值见表 2。由表可见, 日粮中碳水化合物实测值稍低于理论值, 脂肪和蛋白质的实测值除了第 5 组和第 7 组外, 其余组均稍低于理论值。

饲料原料全部经过粉碎, 过 40 目筛, 按配比称量后, 微量成分采取逐级扩大法添加, 并与大宗原料混合均匀, 加油和水后再次均匀混合, 用小型颗粒饲料机制粒为直径为 2.0mm 的颗粒饲料, 采用热干燥方法, 于烘箱内 85℃ 烘干, 储存于在密封塑料袋中, 置 -20℃ 冰柜内保存直至投喂。

表 1 试验日粮主要原料组分(%)  
Tab.1 Composition of the test dietary ingredients (%)

原料	水分	蛋白质	脂肪	灰分	碳水化合物
白鱼粉	9.1	68.7	6.0	16.2	0.0
小麦淀粉	9.6	3.0	0.3	0.4	86.7
鲱鱼油	1.0	0.0	99.0	0.0	0.0
玉米油	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0

#### 1.2 试验鱼与养殖管理

5000 尾南方鲇鱼鱼苗由南宁市水产良种繁育场提供, 从一尾南方鲇雌鱼的受精卵孵化的上浮稚鱼培育后选择而来。在广西大学水产养殖基地暂养驯化一周后开始正式分组试验, 暂养期间, 按鱼体重 5% 每日 3 次投喂蛋白质含量为 36% 的斑点叉尾鲷鱼苗饲料。取其中大小匀称、体表完整、游动活泼的幼鱼为试验鱼, 每尾称重, 分组。初始体重(2.0±0.0)g 的 1200 尾南方鲇幼鱼养殖于室外水泥池(10.0m×8.0m×1.5m)中 64 个尼龙网箱(1m×0.8m×1m)内, 中架设直径一个为 15cm, 高 3cm 的白色塑料食台。每个网箱内养殖 20 尾鱼。养殖网箱上方布置一半面积黑色遮光网以防养殖池内试验鱼被日光直接照射。室内为透明塑料屋顶, 光周期为自然周期。试验共设计了 21 种试验日粮, 其中 20 种日粮分别随机投喂 60 个网箱中的试验鱼(每个日粮组 3 个平行网箱), 另 1 中心组日粮设 4 个平行分别随机投喂 4 个网箱中的试验鱼。试验水源为曝气自来水, 试验期间采用微流水交换, 试验 20d 前换水频率为每天换水 1/10, 20d 后为每天换水 1/5。整个试验期间水质监测(每天测 3 次水温; 每周测 1 次水质指标)情况为: 水温(29.3±3.5)℃, 溶解氧为(8.2±0.2)mg/L, pH 7.0±0.2, 氨氮(0.59±0.01)mg/L, 总硬度为(1.55±0.18)L<sup>-1</sup>, 钙含量为(25.9±0.2)mg/L, 亚硝酸盐为(0.122±0.07)mg/L, 硝酸盐为(0.102±0.011)mg/L。

表2 试验日粮中常量营养素组成  
Tab.2 The macronutrient composition of test diets

试验日粮组	设计营养水平(%)			实际营养水平(%)			总能 <sup>b</sup> (kJ/g)
	碳水化合物 <sup>a</sup>	脂肪	蛋白质	碳水化合物 <sup>a</sup>	脂类	蛋白质	
1	33.0	15.0	33.0	32.9	15.2	33.2	19.5
2	33.0	12.0	36.0	32.8	12.2	36.3	19.0
3	33.0	9.0	39.0	32.9	9.0	39.2	18.5
4	33.0	6.0	42.0	32.8	6.1	42.2	18.0
5	30.0	18.0	33.0	29.9	17.9	33.1	20.0
6	30.0	15.0	36.0	29.8	15.2	36.2	19.7
7	30.0	12.0	39.0	29.7	12.1	39.2	19.1
8	30.0	9.0	42.0	29.6	9.2	42.3	18.7
9	30.0	6.0	45.0	29.5	6.1	45.2	18.2
10	30.0	3.0	48.0	29.8	3.1	48.3	17.8
11	27.0	18.0	36.0	26.9	18.2	36.1	20.3
12	27.0	15.0	39.0	26.8	15.1	39.1	19.8
13	27.0	12.0	42.0	26.6	12.2	42.3	19.4
14	27.0	9.0	45.0	26.9	9.3	45.2	19.0
15	27.0	6.0	48.0	26.7	6.1	48.1	18.4
16	27.0	3.0	51.0	26.9	3.2	51.3	18.0
17	24.0	15.0	42.0	23.7	15.2	42.1	20.0
18	24.0	12.0	45.0	23.8	11.9	45.1	19.4
19	24.0	9.0	48.0	23.9	9.2	48.4	19.2
20	24.0	6.0	51.0	23.6	6.1	51.3	18.6

注: <sup>a</sup>碳水化合物=100-(蛋白质+脂肪+灰分+水分); <sup>b</sup>能量: 按照蛋白质=23.64kJ/g, 脂肪=39.54kJ/g, 碳水化合物=17.15kJ/g 计算

试验期间按试验组别饲喂相应的试验日粮, 每天投喂3次, 投喂时间为8:00、13:00和18:00, 同时观察试验鱼情况, 一旦发现死鱼立即捞出。投喂量以鱼体重的10%—15%称料, 分成3次投喂, 每次投喂时将试验日粮少量多次投入水泥池中食台内, 观察试验鱼的进食情况, 投喂后3min后若饲料台上有剩余的饲料, 则结束投喂。记录每天余料。每20天称重并调整投喂量。试验称重前停止饲喂一天。试验结束时, 将试验各组试验鱼逐一进行称重。称重后取样并将样品保存于-25℃冰柜中。

### 1.3 样品采集和分析

试验开始前取饲料主要原料和各组日粮样品分析主要营养成分。试验结束时, 对试验各组的鱼逐一计数、称重, 计算其存活率和特定生长率。试验结束后在试验各组随机取6尾鱼(每个平行组2尾鱼), 分别称重, 烘干, 用于测全鱼主要营养成分; 剩余的鱼, 分别称重, 解剖取肝脏称重, 计算肝/体比并收集肝脏样品。试验日粮、鱼体和肝脏的水分、粗蛋白、粗脂肪和粗灰分含量按AOAC有关标准方法测定

(AOAC, 1990)。鱼体糖原和日粮淀粉含量的检测分别采用消化酶法和减量法(总干重减去蛋白质、脂肪和灰分含量)(Hemre *et al*, 1989, 1998)。

有关参数计算公式如下:

成活率(SR)(%) = 试验结束鱼尾数/试验开始时尾数×100,

特定生长率(SGR)(%/d) =  $(\ln W_f - \ln W_i) \times 100 / t$ ,

肝体指数(HSI)(%) =  $W_h / W_f \times 100$ ,

其中,  $W_i$  为试验开始时鱼体重(g),  $W_f$  为试验结束时鱼体重(g),  $t$  为养殖试验天数(d);  $W_h$  为肝脏质量(Halver *et al*, 2002)。

各试验日粮组取12尾鱼肝脏样品用于肝脏组织学检测, 采用标准组织学样品处理方法, 用乙醇脱水、二甲苯平衡和石蜡固定, 切片5μm, 采用碘酸-席夫反应(PAS)、苏木精和伊红(H.E.)染色, 最后镜检。通过肝脏组织学镜检检查各试验日粮组鱼肝脏是否出现相关组织病变。

### 1.4 试验数据计算与统计

采用SPSS19.0数据统计软件包对试验各组间数

据进行统计分析, 试验结果经过一元方差分析(One-way ANOVA)后, 用平均数 $\pm$ 标准差表示。先进行方差齐性分析, 方差齐性运用 LSD 法进行单因素方差多重比较, 显著水平采用 0.05。然后进行 Duncan's 多重比较各试验组间差异的显著性,  $P < 0.05$  表示差异显著。

## 2 结果

### 2.1 各试验日粮组南方鲇幼鱼的成活率与生长性能

各试验日粮组南方鲇幼鱼的体重与成活率见表 3, 特定生长率(SGR)见图 2。试验开始时, 各组鱼初始体重均为  $(2.0 \pm 0.0)$ g, 试验结束时(40d)为  $(41.6 \pm 3.0)$ g。平均死亡率为  $2.5\% \pm 2.7\%$ , 平均特定生长率为  $(7.58 \pm 0.19)\%/d$ 。试验结果表明, 试验日粮中 3 种常量营养素水平对成活率没有显著影响( $P > 0.05$ )。当日粮蛋白质水平 45% 时, 其特定生长率随着日粮蛋白质水平上升而增加, 当日粮蛋白质水平在 33%—36% 时, 其特定生长率显著降低( $P < 0.05$ )。当日粮脂肪水平 9% 时, 其特定生长率随着日粮脂肪水平上升而增加。但当日粮碳水化合物含量为 33% 时, 南方鲇幼鱼的特定生长率急剧下降( $P < 0.05$ )。当日粮蛋白质含量为

45%、脂肪含量为 12% 和 9%, 碳水化合物含量为 24% 和 27% 时, 南方鲇幼鱼特定生长率最高, 分别为  $(7.93 \pm 0.21)\%/d$  与  $(7.90 \pm 0.20)\%/d$ 。

### 2.2 各试验日粮组南方鲇幼鱼鱼体蛋白质、脂肪、糖原和肝脏脂肪、肝糖原含量与肝体指数

各试验日粮组南方鲇幼鱼鱼体蛋白质、脂肪、糖原和肝脏脂肪、肝糖原含量与肝体指数(湿重)见表 4、图 3、图 4。试验结果表明, 日粮蛋白质水平对南方鲇幼鱼鱼体蛋白质含量无显著影响( $P > 0.05$ )(图 3a)。随着日粮脂肪水平的升高全鱼脂肪含量显著增加, 当日粮中脂肪含量 12% 时, 南方鲇幼鱼肝脏脂肪含量显著增加( $P < 0.05$ ), 但日粮蛋白质和碳水化合物水平对其无显著影响( $P > 0.05$ )(图 3b, 图 4a)。当日粮中碳水化合物水平为 33% 时, 南方鲇幼鱼全鱼和肝糖原含量均显著增加( $P < 0.05$ ), 但日粮蛋白质和脂肪水平对其无显著影响( $P > 0.05$ )(图 3c, 图 4b)。日粮中 3 种常量营养素对南方鲇幼鱼肝体指数(HSI)没有显著影响( $P > 0.05$ )(图 4c)。

### 2.3 各试验日粮组南方鲇幼鱼肝脏组织学观察

各试验日粮组南方鲇幼鱼肝脏组织学观察结果见表 5。对试验各组南方鲇幼鱼肝脏组织学观察发现,

表 3 各试验日粮组鱼平均体重(g)和死亡率(%)  
Tab.3 The average weight (g) and mortality (%) of fish in test groups

试验日粮组(碳水化合物/ 脂肪/蛋白质%)	体重(g)		死亡率(%)
	Day0	Day40	
1(33/15/33)	2.0 $\pm$ 0.0	34.7 $\pm$ 2.3	1.7 $\pm$ 2.9
2(33/12/36)	2.0 $\pm$ 0.0	37.5 $\pm$ 2.6	5.0 $\pm$ 5.0
3(33/19/39)	2.0 $\pm$ 0.0	39.0 $\pm$ 1.9	0.0 $\pm$ 0.0
4(33/16/36)	2.0 $\pm$ 0.0	40.0 $\pm$ 2.8	0.0 $\pm$ 0.0
5(30/18/33)	2.0 $\pm$ 0.0	39.5 $\pm$ 2.4	6.7 $\pm$ 2.9
6(30/15/36)	2.0 $\pm$ 0.0	38.8 $\pm$ 1.8	3.3 $\pm$ 2.9
7(30/12/39)	2.0 $\pm$ 0.0	39.7 $\pm$ 1.1	0.0 $\pm$ 0.0
8(30/9/42)	2.0 $\pm$ 0.0	41.5 $\pm$ 2.2	0.0 $\pm$ 0.0
9(30/6/45)	2.0 $\pm$ 0.0	45.6 $\pm$ 2.8	5.0 $\pm$ 5.0
10(30/3/48)	2.0 $\pm$ 0.0	39.1 $\pm$ 2.5	0.0 $\pm$ 0.0
11(27/18/36)	2.0 $\pm$ 0.0	42.8 $\pm$ 2.7	3.3 $\pm$ 2.9
12(27/15/39)	2.0 $\pm$ 0.0	42.6 $\pm$ 2.9	0.0 $\pm$ 0.0
13(27/12/42)	2.0 $\pm$ 0.0	43.6 $\pm$ 2.1	5.0 $\pm$ 5.0
14(27/9/45)	2.0 $\pm$ 0.0	47.3 $\pm$ 2.3	3.3 $\pm$ 2.9
15(27/6/48)	2.0 $\pm$ 0.0	44.9 $\pm$ 2.6	0.0 $\pm$ 0.0
16(27/3/51)	2.0 $\pm$ 0.0	41.1 $\pm$ 2.2	3.3 $\pm$ 2.9
17(24/15/42)	2.0 $\pm$ 0.0	43.2 $\pm$ 1.9	0.0 $\pm$ 0.0
18(24/12/45)	2.0 $\pm$ 0.0	47.8 $\pm$ 2.4	5.0 $\pm$ 5.0
19(24/9/48)	2.0 $\pm$ 0.0	41.3 $\pm$ 1.9	0.0 $\pm$ 0.0
20(24/6/51)	2.0 $\pm$ 0.0	42.3 $\pm$ 2.3	3.3 $\pm$ 2.9

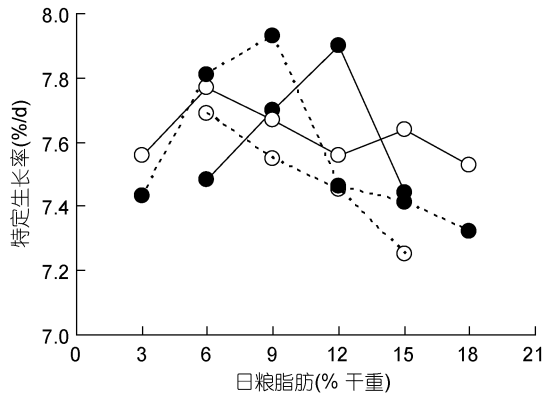


图2 不同常量营养素水平的各试验日粮组鱼的特定生长率(%)

Fig.2 Specific growth rates (%) of fish fed diets with varying macronutrient composition

注: 图中—●—、—○—、---●---、---○---分别表示日粮中碳水化合物水平为 24%、27%、30%、33%

当日粮脂肪水平为 12%时, 部分样品肝细胞中出现一些分离的、大小不一的圆形空泡(脂肪滴), 发生脂肪变性; 而当日粮脂肪水平在 15%—18%时, 大多数肝细胞中出现大量较大的圆形空泡, 脂肪变性较为严重。当日粮中碳水化合物含量为 33%以上时, 南方

鲇幼鱼肝细胞中糖原颗粒数量明显增加。但是在肝细胞出现大量空泡化现象和糖原颗粒时, 肝脏中血管和结缔组织成分依然保持正常, 没有出现病理变化。

### 3 讨论

蛋白质、脂肪和碳水化合物这三种常量是养殖鱼类日粮中主要营养物质, 其在日粮中的适宜添加量是鱼类营养需要量研究的首要内容(Halver *et al.*, 2002; 徐维娜等, 2011)。由于鱼类蛋白质、脂肪和碳水化合物这三种常量营养素在机体代谢与能量转化方面有密切的关系, 按照鱼类营养学传统折线法或曲线法, 一次只能进行一种常量营养素的需要量研究, 鱼类日粮中这三种常量营养素的适宜需要量需要多次试验与评价才能确定, 如在鲑科鱼幼鱼的初期研究认为其日粮蛋白质适宜需要量为 55%—60%, 但以后研究发现日粮脂肪具有较好的节约蛋白质效果, 其营养标准中日粮蛋白质适宜需要量大幅下降为 38%左右(NRC, 1993; Einen *et al.*, 1997)。此外在多次试验间可能存在的试验鱼体大小、试验条件、养殖环境与水温等养殖条件差异往往是影响其结果的可靠性并引发学术争议。为了克服传统折线法或曲线法的缺陷,

表4 试验各组鱼体常量营养素和肝脏脂肪、糖原含量以及肝体指数(湿重%)(n=6)

Tab.4 Whole body macronutrient composition and liver lipid, liver glycogen and hepatosomatic index of experiment fish fed with test diets (wet weight %) (n=6)

试验日粮组	鱼体蛋白质	鱼体脂肪	鱼体糖原	肝脏脂肪	肝脏糖原	肝体指数
1(33/15/33)	18.9±0.3	4.4±0.2	0.50±0.12	5.6±0.5	8.9±1.0	1.8±0.2
2(33/12/36)	19.0±0.2	3.3±0.1	0.56±0.09	4.2±0.6	8.2±1.1	1.9±0.3
3(33/9/39)	19.6±0.4	2.9±0.1	0.68±0.16	3.0±0.2	8.0±0.9	2.0±0.3
4(33/6/36)	18.5±0.2	2.0±0.2	0.58±0.13	3.7±0.3	9.3±1.5	2.1±0.2
5(30/18/33)	19.4±0.3	4.2±0.2	0.38±0.08	4.9±0.4	3.6±0.6	1.8±0.2
6(30/15/36)	18.4±0.2	4.4±0.2	0.40±0.07	5.6±0.5	4.0±0.5	1.8±0.3
7(30/12/39)	18.5±0.3	2.0±0.1	0.48±0.10	5.0±0.3	4.7±0.6	1.9±0.1
8(30/9/42)	19.6±0.3	1.8±0.1	0.48±0.12	3.0±0.2	5.6±0.9	2.5±0.3
9(30/6/45)	19.1±0.4	1.5±0.2	0.45±0.09	2.2±0.3	3.3±0.3	1.9±0.2
10(30/3/48)	18.3±0.3	1.0±0.1	0.44±0.11	2.8±0.3	3.4±0.4	1.5±0.2
11(27/18/36)	18.7±0.3	2.7±0.3	0.42±0.06	2.7±0.4	3.6±0.3	2.2±0.2
12(27/15/39)	19.0±0.3	3.7±0.4	0.46±0.08	3.8±0.5	4.0±0.5	2.1±0.3
13(27/12/42)	19.1±0.2	2.3±0.2	0.43±0.10	2.4±0.3	4.7±0.8	1.8±0.3
14(27/9/45)	19.4±0.4	2.7±0.3	0.48±0.08	2.2±0.2	5.5±0.5	2.6±0.4
15(27/6/48)	18.7±0.3	1.8±0.2	0.43±0.11	2.3±0.3	3.3±0.3	1.7±0.2
16(27/3/51)	18.3±0.3	1.0±0.1	0.38±0.07	2.2±0.1	3.4±0.4	2.0±0.3
17(24/15/42)	19.0±0.4	2.3±0.3	0.43±0.07	4.5±0.4	3.7±0.3	1.9±0.3
18(24/12/45)	18.6±0.3	2.0±0.2	0.43±0.06	2.9±0.3	2.6±0.3	2.6±0.4
19(24/9/48)	19.0±0.3	2.2±0.2	0.40±0.09	2.1±0.4	3.4±0.4	2.4±0.3
20(24/6/51)	18.6±0.4	1.9±0.2	0.37±0.10	2.7±0.3	3.2±0.2	2.3±0.3

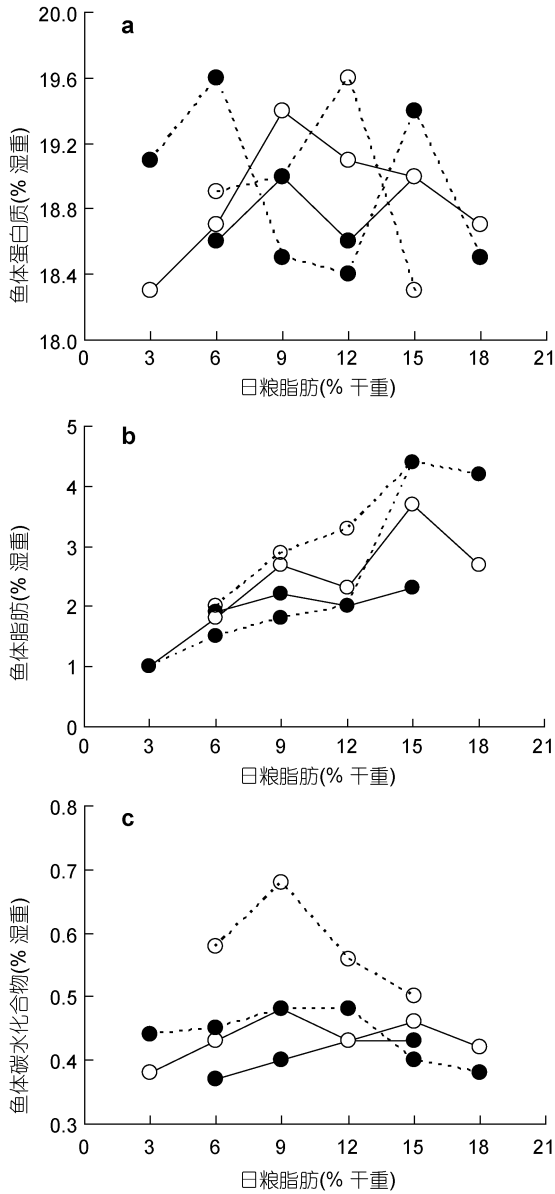


图3 试验各组鱼体常量营养成分组成(%湿重)(n=6)

Fig.3 Whole body macronutrient composition of the fish fed with test diets (wet weight %) (n=6)

注: a. 蛋白质, b. 脂肪, c. 碳水化合物。图中— —、— —、— —、— — 分别表示日粮中碳水化合物水平为 24%、27%、30%、33%

有一些采用正交法进行鱼类日粮适宜常量营养素需要量研究报道,但是不同试验由于通用的数学模型,其试验结果容易产生较大偏差,目前已经很少使用。这是在众多的养殖鱼类品种中,目前只有少数确定了营养标准与适宜的日粮蛋白质、脂肪和碳水化合物需要量的主要缘故(NRC, 1993; Halver *et al*, 2002)。因此,在鱼类蛋白质、脂肪和碳水化合物 3 种常量营养需要量研究方面中寻找适宜的研究方法具有重要意义。

Cornell 均匀设计法是一种在设定的变化范围内,对 3 个具有相关关系的变量进行同时、连续、系统变化研究的随机优化数学模型(Cornell, 1990)。在水产营养研究中,它满足了蛋白质、脂肪和碳水化合物这 3 种常量营养素的特性,理论上通过一次试验就可以得到养殖鱼类适宜的日粮蛋白质、脂肪和碳水化合物适宜需要量。但目前为止,国外水产日粮中 3 种常量营养素需要量研究中只有个别的相关报道(Hamre, 2003),原因可能主要是 Cornell 均匀设计法每个试验

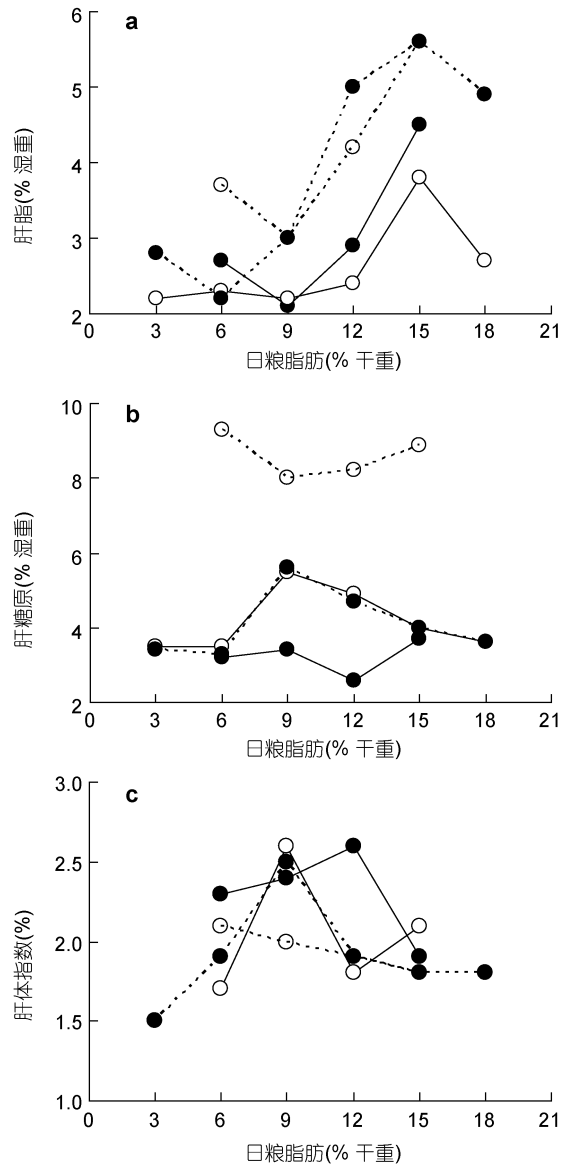


图4 各试验日粮组鱼肝脏脂肪(a)、肝糖原含量(b)和肝体指数(c)(%湿重)

Fig.4 The concentration of liver lipid (a), liver glycogen (b) and hepatosomatic index (c) of the fish fed with test diets (wet weight %) 注: 图中— —、— —、— —、— — 分别表示日粮中碳水化合物水平为 24%、27%、30%、33%

表5 不同日粮碳水化合物和脂肪水平组鱼肝细胞糖原含量与空泡化程度( $n=12$ )  
Tab.5 Hepatocellular glycogen and vacuolization in the fish fed with various carbohydrate and lipid diets ( $n=12$ )

肝细胞糖原	24%	27%	30%	33%		
+	12	10	8	1		
++	0	2	3	3		
+++	0	0	1	8		
肝细胞空泡化	3%	6%	9%	12%	15%	18%
-	12	10	10	4	1	0
+	0	2	1	4	5	3
++	0	0	1	3	4	5
+++	0	0	0	1	2	4

注: - 为无空泡化; + 为轻度空泡化; ++ 为中度空泡化; +++ 为严重空泡化

组均不设平行组, 只有试验设中心组设 4 个平行组, 通过中心组的组内显著性检验来评价试验的可靠性, 这种方法在工程方案优化中得到了广泛的应用。但在动物试验中, 由于动物死亡率与养殖条件的差异, 如果仅仅通过中心组的 4 个平行组来检验试验的可靠性, 这可能会影响试验组数据的可信度。所以目前应用 Cornell 均匀设计法研究动物(鱼类)日粮适宜的蛋白质、脂肪和碳水化合物需要量受到一些质疑。因此本试验按照鱼类营养学试验原则, 取消中心组, 在各试验组内设立 3 个平行组予以改进 Cornell 均匀设计法, 以提高试验组内数据的可信性。

试验结果表明, 日粮中不同常量营养素水平对南方鲇幼鱼的成活率无显著影响(表 3)。当日粮蛋白质水平 45% 和脂肪水平 9% 时, 其特定生长率随着日粮蛋白质、脂肪水平上升而增加。当南方鲇幼鱼日粮中碳水化合物含量为 33% 时, 其生长明显减缓, 这表明日粮中高碳水化合物含量和低蛋白质含量能够抑制南方鲇幼鱼生长。当日粮蛋白质含量为 45%、脂肪含量为 12% 和 9%, 碳水化合物含量为 24% 和 27% 时, 南方鲇幼鱼特定生长率最高。不同日粮蛋白质水平对南方鲇幼鱼鱼体蛋白质含量无明显影响。日粮脂肪水平的增加相应提高南方鲇幼鱼全鱼脂肪和肝脏脂肪含量, 但日粮蛋白质和碳水化合物水平对其无显著影响。从试验数据和组织学检测结果来看, 当南方鲇幼鱼日粮碳水化合物 30% 时, 未见糖原在鱼体和肝脏中的大量聚集。这表明日粮碳水化合物水平 30% 时, 幼鱼能够较好地代谢这些糖类。当日粮中碳水化合物水平达到 33% 时, 南方鲇幼鱼全鱼碳水化合物含量和肝糖原含量均显著增加, 肝细胞中糖原颗粒数量明显增加, 但日粮蛋白质和脂肪水平

对其无显著影响。由此可见, 脂肪和碳水化合物在鱼体的积累反映了在南方鲇幼鱼鱼体能量代谢中, 当日粮碳水化合物和脂肪水平过高时并没有较好地起到节约蛋白质的作用。本试验中, 日粮脂肪水平的提高最终表现为鱼体与肝脏脂肪含量增加, 这表明肝脏是鱼体脂肪代谢的重要场所。然而, 鱼肝脏脂肪储存水平在何种程度, 才不会影响南方鲇幼鱼健康? 进一步研究发现, 当日粮中脂肪水平 12% 时, 过量脂肪将在肝脏中大量聚集, 这些脂肪不能完全被南方鲇幼鱼有效地代谢利用并引起肝脏较为严重的脂肪变性, 损害了肝细胞功能。因此, 对于南方鲇幼鱼来说, 9% 日粮脂肪为其安全添加水平。本试验结果认为, 日粮蛋白质 45%、脂肪 9%、碳水化合物为 27%、总能为 19.0kJ/g。对于南方鲇幼鱼日粮是适宜的。

综上所述, 本试验认为初始体重 2g 左右的南方鲇幼鱼日粮中蛋白质、脂肪和碳水化合物适宜需要量应分别为 45%、9% 和 30%, 日粮总能为 19.0kJ/g。谢小军教授团队采用传统方法研究(张文兵等, 2000, 2001; 付世建等, 2005; 罗毅平等, 2009)认为, 当南方鲇幼鱼(初始体重为 12—44g 左右)日粮中脂肪含量为 9% 时, 适宜的日粮蛋白质需要量为 47%, 日粮中碳水化合物上限为 30%, 这与本研究结果基本一致。本试验结果表明, 在试验组中增加平行组的 Cornell 法是一种综合研究南方鲇幼鱼常量营养素(蛋白质、脂肪和碳水化合物)适宜需要量的可行方法, 在试验组中增加平行组弥补了该方法的缺陷, 满足了水产营养需要量研究的必要条件, 它弥补了传统的传统折线法或曲线法和正交法的缺陷, 节约了大量人力和物力, 降低了不同试验条件产生的误差, 增加了试验结果的可信性。在今后鱼类常量营养需要量研究中,

Cornell 法可能是一种具有广泛应用价值设计方法。

### 参 考 文 献

- 付世建, 谢小军, 2005. 饲料碳水化合物水平对南方鲇生长的影响. 水生生物学报, 29(4): 393—398
- 宁毅, 冯健, 吴彬等, 2012. 应用 Cornell 方法对重口裂腹鱼(*Schizothorax (Racoma) davidi*)幼鱼适宜常量营养物质需求量研究. 海洋与湖沼, 43(4): 748—755
- 关颖男, 1990. 混料试验设计. 上海: 上海科学技术出版社, 16—38
- 张文兵, 谢小军, 付世建等, 2000. 南方鲇的营养学研究: 饲料的最适蛋白质含量. 水生生物学报, 24(6): 603—609
- 张文兵, 谢小军, 付世建等, 2001. 南方鲇的营养学研究: 饲料脂肪对蛋白质的节约效应. 水生生物学报, 25(1): 70—75
- 陈斌, 冯健, 彭淇等, 2013. 长吻鮠幼鱼日粮中适宜常量营养物质需求量研究. 大连海洋大学学报, 28(2): 179—185
- 罗毅平, 谢小军, 2009. 南方鲇对饲料碳水化合物化合物的代谢适应. 水生生物学报, 33(1): 140—145
- 黄钧, 冯健, 孙挺等, 2009. 瓦氏黄颡鱼(*Pelteobagrus fulvidraco* Richardson)幼鱼日粮中主要营养素需要量研究. 海洋与湖沼, 40(4): 437—445
- AOAC, 1990. Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists. 15<sup>th</sup> edn. Arlington, Virginia, USA, 36—42
- Cornell J A, 1990. Experiments with Mixtures. Wiley, New York, USA, 1—45
- Einen O, Roem A J, 1997. Dietary protein/energy ratios for Atlantic salmon in relation to fish size: growth, feed utilization and slaughter quality. Aquaculture Nutrition, 3(2): 127—140
- Halver J E, Hardy R W, 2002. Fish Nutrition. Academic Press, third edition. London, UK, 1—2, 51, 145—151
- Hamre K, 2003. Macronutrient composition of formulated diets for Atlantic halibut (*Hippoglossus hippoglossus* L.) juveniles. Aquaculture, 94(3): 233—244
- Hemre G I, Hansen T, 1998. Utilization of different dietary starch sources and tolerance to glucose loading in Atlantic salmon (*Salmo salar*), during part-smolt transformation. Aquaculture, 161: 145—157
- Hemre G I, Lie Ø, Lied E *et al*, 1989. Starch as an energy source in feed for cod (*Gadus morhua*): digestibility and retention. Aquaculture, 80: 261—270
- NRC (National Research Council), 1993. Nutrient Requirements of Fish. National Academy Press, Washington D C, USA: 112
- Scheffe H, 1958. Experiments with mixture. Journal of Royal Statistical Society, 20B: 334—360
- Zhang C Q, 2005. Research on mixture experimental designs. 广州大学学报, 4(5): 381—385

## OPTIMAL MACRONUTRIENTS (PROTEIN, LIPID AND CARBOHYDRATE) OF FORMULATED DIETS FOR SOUTHERN CATFISH (*SILURUS MERIDIONALIS*) JUVENILES

FENG Jian, PENG Qi, WU Bin, CHEN Bin, LIANG Pin-Heng  
(Marine Research Center, Guangxi University, Nanning, 530004)

**Abstract** To investigate the optimal composition of macronutrients (protein, lipid and carbohydrate) for Southern catfish (*Silurus meridionalis*) juveniles [(2.0±0.0)g initial weight], Cornell Design in experiments with mixture was used. Protein, lipid, and carbohydrate varied between 33%—51%, 3%—18% and 24%—33% respectively and the test lasted for 40 days. The experimental results show that the dietary macronutrient composition was not reflected in the survival rate of the fish significantly ( $P < 0.05$ ). There was a positive effect on the growth when increasing dietary protein levels up until 45% or lipid levels up until 9%. The lipid contents in fish body and liver increased significantly ( $P > 0.05$ ), and fat in hepatocytes was degenerated obviously as dietary lipid level was  $\geq 12\%$ . The specific growth rates of 33% dietary carbohydrate group was significantly reduced while glycogen in the body and liver boosted compared to those of lower percentage dietary groups ( $P < 0.05$ ). It could be concluded that the optimal protein requirement was 45%, based on the limits of 9% for lipids and  $\leq 30\%$  for carbohydrate in the diets, while the dietary general energy is about 19.0kJ/g for Southern catfish juveniles.

**Key words** Southern catfish; *Silurus meridionalis*; Cornell Design; macronutrient; protein; lipid; carbohydrate