百惠康

对生长中期草鱼生长和健康的作用及其机制研究

实施课题组
四川农业大学

周小秋

教授，博士生导师

- 四川农业大学学术委员会副主任；“新世纪百千万人才工程”国家级人选，国务院政府特殊津贴专家，国家农业科研杰出人才，全国优秀科技工作者，国家农业部现代农业产业技术体系岗位科学家，四川省首届杰出人才奖获得者，教育部新世纪优秀人才支持计划人选，四川省学术和技术带头人。

研究方向

- 主要从事水产动物消化能力、肠道健康、机体健康和肉质营养调控及其机制的研究；主持获国家科技进步二等奖1项、省科技进步一等奖1项、省科技进步二等奖1项。

试验目的

·考察“百惠康”以不同比例替代鱼粉对生长中期草鱼生产性能以及草鱼抵抗老三病“肠炎、赤皮、烂鳃”能力的作用和作用机制，并确定草鱼饲粮中“百惠康”替代鱼粉的最适比例。

试验方法

试验选择平均体重为180 g左右的健康草鱼540尾，分成6个处理，分别饲喂含不同水平“百惠康”替代鱼粉的饲粮60天，考察“百惠康”替代鱼粉对草鱼生产性能、肠道和肝脏抗氧化损伤能力及肠道微生物的影响；生长试验结束后分别进行为期6天和3天的嗜水气单胞菌和柱状黄杆菌攻毒试验，考察“百惠康”对草鱼抗“肠炎、赤皮、烂鳃”能力的作用和作用机制。试验设计见表1。

表1 试验设计

处理组	1	2	3	4	5	6
重复数	3	3	3	3	3	3
每重复尾数	30	30	30	30	30	30
“百惠康”替代鱼粉比例	0%	20%	40%	60%	80%	100%

试验结果

适宜替代比例的百惠康提高了生长中期草鱼采食量、饲料效率、增重百分比，促进其生长，降低了攻毒后肠炎、赤皮和烂鳃的发病率，增强了抵抗肠炎、赤皮和烂鳃的能力（$P < 0.05$）。适宜水平的百惠康替代鱼粉促进鱼类生长可能与其提高了鱼类的饲料蛋白质和脂肪表观消化率、增强了肠道健康和机体健康有关。

在以 4% 鱼粉为对照的基础上，以增重百分比和抵抗赤皮、烂鳃以及前、中、后肠肠炎病的能力为标识，根据二次回归模型，确定的生长中期草鱼（183–664g）饲粮中百惠康替代鱼粉最适水平分别为 42.96%、47.87%、41.64%、44.19%、45.73%、44.86%。

合作试验研究报告

试验饲粮

饲粮配方见表2，以鱼粉或百惠康、膨化去皮豆粕、棉粕和菜粕为主要蛋白源，鱼油和大豆油为主要脂肪源，并添加维生素和矿物元素预混料等配制6个等氮等脂饲粮。对照组鱼粉含量为4%，处理1–6饲粮中“百惠康”替代鱼粉比例分别为0%、20%、40%、60%、80%和100%，以甘氨酸调节等氮。配方中膨化去皮豆粕、棉粕、菜粕均粉碎过60目筛。饲粮所有组分充分混匀并制粒，制成的饲料装在塑料袋中并存储在–20 ℃。

表2 饲粮配方

原料（%）	处理1	处理2	处理3	处理4	处理5	处理6
鱼粉	4.00	3.20	2.40	1.60	0.80	0.00
百惠康	0.00	0.80	1.60	2.40	3.20	4.00
膨化去皮豆粕	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00
棉粕	17.90	17.90	17.90	17.90	17.90	17.90
菜粕	17.00	17.00	17.00	17.00	17.00	17.00
鱼油	2.60	2.65	2.71	2.77	2.83	2.89
豆油	1.31	1.31	1.31	1.31	1.31	1.31
面粉	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
α淀粉	27.42	27.29	27.14	26.94	26.79	26.62
磷酸二氢钙	1.40	1.40	1.40	1.45	1.45	1.48
矿物元素预混料1	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
维生素预混料2	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
氯化胆碱预混料	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
乙氧基喹啉（30%）	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
赖氨酸（98.1%）	0.00	0.01	0.02	0.04	0.05	0.07
蛋氨酸（97.7%）	0.04	0.04	0.05	0.06	0.07	0.07
色氨酸（99%）	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13
苏氨酸（98.5%）	0.12	0.13	0.14	0.15	0.16	0.17
甘氨酸（98.99%）	0.03	0.09	0.14	0.20	0.26	0.32
营养组成3						
粗蛋白	28.64	28.66	28.69	28.67	28.66	28.68
粗脂肪	4.30	4.41	4.55	4.46	4.40	4.60
n–3	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04
n–6	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96
有效磷	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40

[1]每千克维生素预混料含：VA（1,000，000 IU/g），0.19g；VD3（500，000 IU/g），0.20g；VE（50%），23.23g；VK3（96%），1.98g；VB12（1%），0.94g；D-生物素（2%），0.75g；叶酸（95%），0.17g；硝酸硫胺素（98%），0.09g；Vc（95%），9.77g；烟酸（99%），3.44g；肌醇（97%），28.53g；泛酸钙（90%），4.19g；核黄素（80%），0.73g；维生素B6 (98%)，0.45g；用玉米淀粉填充至1kg。

[2]每千克矿物质预混料含：MnSO4.H2O（31.8% Mn），2.6590 g；MgSO4.H2O（15.0% Mg），256.7933g；FeSO4.H2O（30.0% Fe），12.6083g；ZnSO4.H2O（34.5% Zn），8.8700 g；CuSO4.5H2O（25.0% Cu），0.9560g；CaI（3.2% I），1.5625g；Na2SeO3（44.7% Se），0.0611 g；用玉米淀粉填充至1kg。

[3]饲料中粗蛋白和粗脂肪为实测值，n3、n6和有效含量为计算值。

消化实验

参考本研究室建立的方法开展消化试验。取处理1–6的饲粮加入5 g/kg Cr_2O_3配制消化试验饲粮。选取540尾均重为360g左右的健康草鱼，随机分为6组，每组3个重复，每个重复30尾鱼，分别饲喂含Cr_2O_3的处理1–6的饲粮。饲喂管理同生长试验。经过10天适应期后，在第11天第一次饲喂6h后收集粪便。粪样经速冻后保存在–20℃备用。

攻毒实验

（1）嗜水气单胞菌攻毒

生长试验结束后，每个处理随机选取体重接近的24尾鱼（每个重复8尾鱼），经过5天的适应期后腹腔注射浓度为1.8×108 cfu/mL的嗜水气单胞菌进行攻毒试验，攻毒试验进行6天。饲养管理参照生长试验的饲养管理进行。

（2）柱状黄杆菌攻毒

生长试验结束后，每个处理随机选取体重接近的24尾鱼（每个重复8尾鱼）进行柱状黄杆菌攻毒试验。在经过5天的适应期后，用浓度为1.7×108cfu/mL的柱状黄杆菌浸泡鱼体3小时，然后将所有鱼重新转至各自的处理组网箱中进行3天的饲养，每天观察鱼体活动、发病情况。

考察指标

生产性能

在试验分组前和试验结束后分别对试验鱼进行称重，并计算每个处理鱼的增重和特异性生长率（SGR）。试验过程中，记录每天的投喂量，并收集残饵，试验结束后计算采食量和饲料效率。整个试验期间观察鱼的体色、鳃、鳍条等外观变化和游动情况，并准确记录变化症状以及出现症状的尾数和时间。记录试验期间每个处理的死亡尾数及时间，试验结束后计算成活率。

疾病（肠炎、赤皮、烂鳃）发病率

嗜水气单胞菌攻毒试验结束后，观察每个处理 24 尾鱼皮肤和鳍糜烂、出血等情况，对赤皮症状进行统计评分；同时解剖观察肠道充血、红肿等情况，对肠炎症状进行统计评分，最后计算赤皮和肠炎发病率，评分计算方法参考 Xu et al. (2016) 和 Pan et al. (2016)。

柱状黄杆菌攻毒试验结后，解剖观察每个处理 24 尾鱼鳃糜烂、红肿、出血等情况，对烂鳃症状进行统计评分，最后计算烂鳃发病率，评分计算方法参考 Pan et al. (2018)。

抗氧化指标测定

生长试验结束后，每个处理组选择 6 尾鱼，取肠道和肝胰脏于液氮中速冻后，保存于 –80℃用于抗氧化指标的测定。将冷冻的肠道和肝胰脏从 –80℃冰箱取出后，按比例加入生理盐水制成匀浆，然后在 4℃ 6000 g 离心 20 min，取上清液用于抗氧化指标的测定。

MDA 和 PC 含量的测定分别参照 Livingstone et al. (1990) 和 Armenteros et al. (2009) 的方法进行；总抗氧化能力（T–AOC）的测定参照试剂盒说明书；超氧化物歧化酶（SOD）和谷胱甘肽过氧化物酶（GPx）酶活力的测定参照 Zhang et al. (2008) 的方法；谷胱甘肽硫转移酶（GST）酶活力的测定参照 Lushchak et al. (2001)；过氧化氢酶（CAT）酶活力测定参照 Aebi (1984) 的方法；还原性谷胱甘肽（GSH）含量测定参照 Vardi et al. (2008) 方法进行。蛋白含量的测定参考 Bradford (1976)。

免疫力指标

嗜水气单胞菌攻毒试验结束后，每个处理组选择 6 尾鱼，尾静脉抽血，取肠道于液氮中速冻后，保存于 –80 ℃用于相关指标的测定。血液置于 4 ℃冰箱中静止过液后，经 900 g 离心 15 min，取上清液用于常规免疫指标的测定。将冷冻的肠道从 –80℃冰箱取出后，按比例加入生理盐水制成匀浆，然后在 4 ℃，6000 g 离心 20 min，取上清液用于常规免疫指标的测定。

常规免疫指标

溶菌酶活力采用比浊法测定。溶菌酶通过水解细菌细胞壁粘多糖使细菌崩解，从而降低菌液浓度，使透光度增强，根据透光度的变化推测溶菌酶活力（具体操作参照试剂盒说明书）。补体 C3 含量采用速率散射比浊法测定。补体 C3 抗原可与试剂中 C3 抗体发生免疫反应生成免疫复合物，形成一定浊度与补体 C3 的含量成正比。与通过同样处理的校准液比较，即可计算 C3 含量（具体测定方法参考试剂盒说明书）。补体 C4 含量测定的方法和原理与 C3 一致，具体参照试剂盒说明书。免疫球蛋白 IgM 含量采用速率散射比浊法测定。IgM 可与试剂中 IgM 抗原发生免疫反应生成免疫复合物，形成一定浊度与抗体的含量成正比。与通过同样处理的校准液比较，即可计算 IgM 含量（具体操作方法参照试剂盒说明书）。

细胞因子

肠道促炎细胞因子肿瘤坏死因子 α（TNF–α）和白细胞介素 1β（IL–1β）、抗炎细胞因子转化生长因子（TGF–β1）和 IL–10 基因表达采用实时荧光定量 PCR 方法进行测定。前肠、中肠和后肠总 RNA 抽提使用 RNAiso Plus 试剂按说明书进行操作。提取的总 RNA 浓度和质量分别通过核酸蛋白仪和 1% 琼脂糖凝胶电泳检测。以 RNA 为模板按试剂盒说明书进行反转录合成 cDNA。实时荧光定量 PCR 以 cDNA 为模板，按试剂盒说明书加入特异性扩增引物、荧光染料和水，混匀后于 CFX96TM Real–Time System 荧光定量 PCR 仪上进行反应。参考 Livak and Schmittgen (2001) 使用 2–ΔΔCt 法计算 mRNA 相对表达量。

肠道微生物

生长试验结束后，每个重复选取 3 尾鱼，体表消毒后于无菌环境中取肠道内容物测定肠道微生物。肠道嗜水气单胞菌、大肠杆菌和乳酸杆菌数量采用平板计数法测定。用无菌生理盐水稀释肠道内容物至 10–7，然后根据预试验结果选择不同的稀释倍数分别接种嗜水气单胞菌（10–5、10–6 和 10–7）、大肠杆菌（10–4、10–5 和 10–6）和乳酸杆菌（10–3、10–4 和 10–5）到普通肉汤、EMB 和 MRS 培养基进行培养。嗜水气单胞菌和大肠杆菌常规培养，乳酸杆菌厌氧培养，分别培养 12 小时、24 小时和 36 小时后计数。

数据处理与统计分析

结果用平均值 ± 标准差表示，数据用 SPSS 软件进行单因素方差分析，差异显著时进行多重比较分析，P < 0.05 为差异显著。

百惠康对生长中期草鱼生产性能的影响

酵母培养物百惠康替代饲粮中鱼粉对生长中期草鱼生产性能的影响见表 3。如表 3 所示，适宜水平的百惠康替代鱼粉能促进生长中期草鱼生长。在对照组为 4% 鱼粉的基础上，生长中期草鱼的增重、增重百分比和特异性生长率均随百惠康替代鱼粉水平上升而显著提高，当百惠康替代鱼粉达 40% 时均达到最大，超过此水平后均显著降低（P < 0.05）。百惠康替代鱼粉促进生长中期草鱼生长可能与其提高生长中期草鱼摄食量和饲料效率有关。随着饲粮百惠康替代鱼粉水平提高，生长中期草鱼摄食量和饲料效率显著提高，当饲粮百惠康替代鱼粉水平为 40% 时，摄食量和饲料效率分别达到最大（P < 0.05），当超过此水平后生长中期草鱼摄食量随百惠康替代鱼粉水平增加显著降低（P < 0.05），饲料效率在替代比例大于 80% 时饲料效率显著降低（P < 0.05）。然而 100% 的百惠康替代鱼粉组的增重、采食量和饲料效率均显著低于对照组（P < 0.05），表明百惠康不宜 100% 替代鱼粉。百惠康替代鱼粉对生长中期草鱼的成活率无显著影响（P > 0.05）。

百惠康对生长中期草鱼营养物质表观消化率的影响

鱼类生长与鱼体对饲料中营养物质的消化率密切相关。酵母培养物百惠康替代饲粮中鱼粉对生长中期草鱼营养物质表观消化率的影响见表 4。由表 4 可知，百惠康替代鱼粉对干物质表观消化率没有显著影响（P > 0.05）。百惠康替代鱼粉水平为 40% 时显著提高了粗蛋白和粗脂肪表观消化率，但随着替代比例的提高粗蛋白和粗脂肪的表观消化率逐渐降低，当替代水平分别为 100% 和 80% 时显著降低（P < 0.05）。

百惠康对生长中期草鱼抗病能力的影响

鱼类生长与抵抗疾病发生能力也密切相关。酵母培养物百惠康替代饲粮中鱼粉对草鱼抗病力的影响见表 5。由表 5 可知，百惠康部分替代鱼粉能提高草鱼对“肠炎、赤皮和烂鳃”的抗病能力。生长中期草鱼赤皮、烂鳃、肠炎发病率均随百惠康替代水平上升而显著降低，当替代水平为 40% 时均达到最小，超过此水平后均显著升高（P < 0.05）。

百惠康对生长中期草鱼肝脏抗氧化损伤能力的影响

肝脏是动物代谢的关键器官，同时也是重

合作试验研究报告

表3 不同水平百惠康对生长中期草鱼生产性能的影响

百惠康替代比例	0%	20%	40%	60%	80%	100%
初重,g/尾	182.83 ± 0.51	182.72 ± 0.33	183.16 ± 0.19	182.83 ± 0.38	183.05 ± 0.33	183.05 ± 0.58
末重,g/尾	548.67 ± 5.93^{b}	612.44 ± 3.01^{d}	663.78 ± 2.34^{f}	653.33 ± 3.71^{e}	557.56 ± 3.67^{c}	465.33 ± 6.11^{a}
增重,g/尾	365.84 ± 5.93^{b}	429.72 ± 2.83^{d}	480.61 ± 2.19^{f}	470.50 ± 3.79^{e}	374.50 ± 3.34^{c}	282.28 ± 5.69^{a}
PWG（%）	200.10 ± 3.32^{b}	235.18 ± 1.40^{d}	262.39 ± 0.99^{f}	257.34 ± 2.27^{e}	204.58 ± 1.45^{c}	154.20 ± 2.78^{a}
SGR	1.83 ± 0.02^{b}	2.02 ± 0.01^{d}	2.15 ± 0.00^{f}	2.12 ± 0.01^{e}	1.86 ± 0.01^{c}	1.55 ± 0.02^{a}
采食量（g/尾）	593.19 ± 0.03^{b}	675.54 ± 0.07^{d}	730.79 ± 0.08^{f}	727.68 ± 0.05^{e}	599.24 ± 0.02^{c}	469.92 ± 0.10^{a}
饲料效率（%）	61.67 ± 1.00^{b}	63.61 ± 0.43^{cd}	65.77 ± 0.31^{e}	64.66 ± 0.52^{de}	62.50 ± 0.56^{bc}	60.07 ± 1.21^{a}
成活率	100% ± 0.00^{a}	100% ± 0.00^{a}	100% ± 0.00^{a}	100% ± 0.00^{a}	100% ± 0.00^{a}	100% ± 0.00^{a}

数据均采用平均数±标准差表示（每个处理3个重复，每个重复30尾鱼），同行上标为不同小写字母表示差异显著（P < 0.05），为相同字母者表示差异不显著（P > 0.05），下表同。初重Initial body weight (IBW, g/fish), 末重final body weight (FBW, g/fish), 增重百分比percentage weight gain (PWG, %), 特异性生长率specific growth rate (SGR, %/d), 采食量feed intake (FI, g/fish), 饲料效率feed efficiency (FE, %)

表4 百惠康对干物质、粗蛋白和粗脂肪表观消化率（%）的影响

百惠康替代比例	0%	20%	40%	60%	80%	100%
干物质	79.10 ± 1.08^{a}	79.85 ± 0.60^{a}	79.76 ± 1.29^{a}	79.29 ± 0.93^{a}	79.28 ± 1.49^{a}	78.25 ± 1.93^{a}
粗蛋白	88.10 ± 1.21^{ab}	88.29 ± 0.43^{ab}	89.82 ± 0.26^{c}	89.26 ± 0.73^{bc}	88.89 ± 0.49^{bc}	87.13 ± 0.99^{a}
粗脂肪	69.04 ± 1.89^{bc}	69.59 ± 0.44^{c}	70.96 ± 2.28^{c}	67.87 ± 1.92^{bc}	65.19 ± 3.95^{ab}	63.32 ± 1.68^{a}

数据均采用平均数±标准差表示（每个处理3个重复，每个重复30尾鱼），同行上标为不同小写字母表示差异显著（P < 0.05）

表5 不同水平百惠康对生长中期草鱼疾病发病率（%）的影响

百惠康替代比例	0%	20%	40%	60%	80%	100%
赤皮发病率	12.50 ± 0.75^{d}	9.67 ± 0.63^{c}	4.17 ± 0.14^{a}	6.17 ± 0.14^{b}	10.50 ± 1.15^{c}	13.17 ± 0.63^{d}
前肠发病率	18.92 ± 0.52^{d}	12.67 ± 0.29^{b}	7.75 ± 0.50^{a}	12.33 ± 0.95^{b}	16.58 ± 0.38^{c}	22.08 ± 0.80^{e}
中肠发病率	19.00 ± 0.90^{c}	13.75 ± 1.30^{b}	6.33 ± 0.38^{a}	11.92 ± 1.04^{b}	17.17 ± 1.04^{c}	21.08 ± 1.59^{d}
后肠发病率	18.67 ± 0.38^{d}	14.75 ± 1.56^{c}	6.58 ± 0.52^{a}	11.75 ± 0.66^{b}	17.92 ± 0.95^{d}	22.92 ± 1.66^{e}
烂鳃发病率	21.88 ± 0.54^{d}	18.38 ± 0.54^{c}	8.63 ± 0.25^{a}	14.08 ± 1.91^{b}	23.00 ± 1.69^{d}	31.71 ± 0.76^{e}

数据均采用平均数±标准差表示（每个处理3个重复，每个重复8尾鱼），同行上标为不同小写字母表示差异显著（P < 0.05）

要的解毒器官。肝脏的结构完整性是其功能发挥的基础。然而，肝脏非常容易遭受氧化损伤，导致结构完整性破坏。丙二醛（MDA）是脂质过氧化标志终产物之一，其含量的高低可反映脂质过氧化程度。蛋白质羰基（PC）是蛋白质氧化产物，其水平能反映蛋白质氧化损伤程度。酶性抗氧化系统由 SOD、CAT、GPx 等抗氧化酶组成，非酶性抗氧化系统包括 GSH 等抗氧化物质。酵母培养物百惠康替代饲粮中鱼粉对生长中期草鱼肝脏氧化损伤和抗氧化能力的影响见表 6。由表 6 可知，在肝脏中，脂质过氧化产物 MDA 含量随百惠康替代鱼粉水平的升高而显著下降，在替代水平为 40% 时达到最小（P < 0.05），随后逐渐上升。肝脏蛋白质氧化产物 PC 在 20%~60% 百惠康替代鱼粉组最低，在 0% 和 100% 百惠康替代鱼粉组最高（P < 0.05）。肝脏 T–AOC 水平随百惠康替代鱼粉水平升高而显著提高，在替代水平为 40% 和 60% 时达到最大（P < 0.05），随后逐渐下降。总 SOD、GPx、GST 活力随替代水平的升高而升高，在替代水平为 40% 时达到最大（P < 0.05），随后逐渐下降。CAT 活力随替代水平升高而显著提高（P < 0.05），在替代水平为 40% 时达到最大，随后显著下降（P < 0.05）。GSH 含量在百惠康替代鱼粉水平为 40% 时达到最大，100% 替代组最小（P < 0.05），其余各组差异不显著（P > 0.05）。然而，CuZnSOD、MnSOD 活力各处理间差异不显著（P > 0.05）。

百惠康对生长中期草鱼机体免疫功能的影响

鱼体生长受到机体疾病抵抗能力的影响，后者与机体免疫功能密切相关。鱼体免疫功能依赖于非特异性免疫能力和特异性免疫能力。溶菌酶是鱼体非特异性免疫系统的重要组成部分，通过溶解病原菌细胞壁成分杀灭入侵微生物。补体分子包括 C3 和 C4 等在鱼类识别病原菌等免疫应答中具有重要作用。IgM 是鱼类重要的特异性免疫球蛋白，其含量能反映鱼体特异性免疫能力。血清中溶菌酶活力、补体 C3

表6 不同水平百惠康对生长中期草鱼肝脏氧化损伤和抗氧化能力的影响

百惠康替代比例	0%	20%	40%	60%	80%	100%
MDA	19.74 ± 1.16^{d}	915.98 ± 1.06^{b}	13.40 ± 1.02^{a}	14.49 ± 0.57^{a}	17.74 ± 0.72^{c}	21.29 ± 1.44^{e}
PC	2.62 ± 0.12^{c}	1.98 ± 0.18^{a}	1.98 ± 0.16^{a}	1.99 ± 0.17^{a}	2.24 ± 0.18^{b}	2.61 ± 0.22^{c}
T–AOC	2.18 ± 0.21^{a}	2.44 ± 0.22^{b}	2.81 ± 0.25^{c}	2.80 ± 0.26^{c}	2.69 ± 0.09^{bc}	2.55 ± 0.24^{bc}
T–SOD	15.36 ± 0.66^{ab}	15.80 ± 0.21^{ab}	16.05 ± 0.95^{b}	15.91 ± 0.46^{ab}	15.69 ± 0.66^{ab}	15.21 ± 0.51^{a}
CuZnSOD	8.22 ± 0.55^{a}	8.61 ± 0.72^{a}	8.77 ± 0.69^{a}	8.65 ± 0.66^{a}	8.50 ± 0.34^{a}	8.22 ± 0.52^{a}
MnSOD	7.13 ± 0.78^{a}	7.19 ± 0.55^{a}	7.28 ± 0.54^{a}	7.26 ± 0.58^{a}	7.19 ± 0.46^{a}	6.99 ± 0.33^{a}
CAT	33.43 ± 2.88^{b}	37.51 ± 2.97^{c}	42.75 ± 2.74^{d}	37.05 ± 3.55^{bc}	34.07 ± 3.06^{bc}	27.49 ± 2.71^{a}
GPx	148.20 ± 10.98^{a}	158.68 ± 9.33^{ab}	164.73 ± 12.46^{b}	160.95 ± 10.95^{ab}	152.55 ± 8.19^{ab}	147.37 ± 11.87^{a}
GST	102.40 ± 6.79^{a}	111.65 ± 8.54^{ab}	125.29 ± 11.31^{c}	118.47 ± 5.91^{bc}	113.01 ± 8.73^{ab}	102.66 ± 8.49^{a}
GSH	5.73 ± 0.52^{ab}	6.00 ± 0.32^{ab}	6.29 ± 0.54^{b}	6.22 ± 0.57^{ab}	5.93 ± 0.09^{ab}	5.69 ± 0.45^{a}

数据均采用平均数±标准差表示（每个处理3个重复，每个重复8尾鱼），同行上标为不同小写字母表示差异显著（$P < 0.05$）

表7 不同水平百惠康对生长中期草鱼血清免疫的影响

百惠康替代比例	0%	20%	40%	60%	80%	100%
溶菌酶	8.21 ± 0.19^{a}	8.96 ± 0.83^{b}	10.08 ± 0.80^{cd}	10.83 ± 0.58^{d}	10.54 ± 0.70^{d}	9.75 ± 0.35^{c}
补体C3	78.61 ± 3.63^{a}	93.30 ± 4.19^{ab}	103.65 ± 6.36^{bc}	116.38 ± 8.25^{c}	107.57 ± 9.92^{bc}	95.96 ± 31.50^{ab}
补体C4	16.00 ± 0.81^{a}	27.35 ± 1.23^{b}	33.86 ± 1.57^{c}	43.59 ± 1.92^{e}	38.32 ± 3.54^{d}	29.05 ± 2.16^{b}
IgM	102.12 ± 9.86^{a}	112.81 ± 5.55^{a}	125.27 ± 6.76^{b}	140.53 ± 12.07^{c}	132.23 ± 12.92^{bc}	132.50 ± 8.80^{bc}

数据均采用平均数±标准差表示（每个处理3个重复，每个重复8尾鱼），同行上标为不同小写字母表示差异显著（$P < 0.05$）

和 C4 含量以及 IgM 含量能反映动物机体免疫能力。酵母培养物百惠康替代饲粮中鱼粉对生长中期草鱼血清非特异性和特异性免疫功能的影响见表 7。如表 7 所示，在血清中，溶菌酶活力随百惠康替代鱼粉水平上升而逐渐上升，在替代水平为 60% 和 80% 时达到最大，随后显著下降（$P < 0.05$）。IgM、补体 C3 含量随百惠康替代水平上升而逐渐上升，在替代水平为 60% 时达到最大，随后逐渐下降。补体 C4 含量随百惠康替代水平上升而显著上升，替代水平为 60% 时达到最大，随后显著下降（$P < 0.05$）。

百惠康对生长中期草鱼肠道物理屏障功能的影响

鱼体健康受到肠道健康的影响，肠道健康依赖于肠道屏障功能的正常。肠道物理屏障是鱼体肠道屏障结构的重要组成部分，其功能正常依赖于肠细胞的结构完整性。鱼肠细胞结构完整性受到细胞抗氧化损伤能力的影响。百惠康对生长中期草鱼肠道酶性抗氧化能力和非酶性抗氧化能力的影响见表 8。

前肠：MDA 和 PC 含量随百惠康替代鱼粉水平的升高而显著下降，分别在替代水平为 40%~60% 和 20%~60% 时达到最小，随后显著上升（$P < 0.05$）。T–AOC 水平随替代水平升高而逐渐提高，在替代水平为 40% 时达到最大，随后逐渐下降。CuZnSOD 活力随百惠康替代鱼粉水平的升高而升高，在替代水平为 40%、60% 时达到最大，随后逐渐下降。然而，总 SOD、MnSOD 活力各处理间差异不显著（$P > 0.05$）。CAT 活力在百惠康替代鱼粉水平为 20%~80% 组显著高于 0% 和 100% 替代组（$P < 0.05$）。GPx 活力随百惠康替代鱼粉水平的升高而升高，在替代水平为 40% 时达到最大，随后逐渐下降。GST 活力在百惠康替代鱼粉 40% 组显著高于 100% 替代组（$P < 0.05$），其余各组差异不显著（$P > 0.05$）。GSH 含量随替代水平升高逐渐提高，在替代水平为 40% 时达到最大，随后逐渐下降。

中肠：MDA 和 PC 含量随替代水平的升高而显著下降，在替代水平为 40% 时达到最小，随后显著提高（$P < 0.05$）。GST、CAT 活力随替代水平的升高而升高，在替代水平为 40% 时达到最大，随后逐渐下降。然而，T–AOC 水平以及总 SOD、CuZnSOD、MnSOD、GPx 活力及 GSH 含量各处理间差异不显著（$P > 0.05$）。

后肠：MDA 含量随替代水平的升高而显著下降（$P < 0.05$），在替代水平为 40% 时达到最小，随后显著提高（$P < 0.05$）。PC 含量随替代水平升高逐渐下降，在替代水平为 40% 时达到最小，随后逐渐上升。GPx、CAT 活力随替代水平的升高而升高，在替代水平为 40% 时达到最大，随后逐渐下降。GSH 含量随替代水平的升高而显著提高，在替代水平为 40% 时达到最大（$P < 0.05$），随后逐渐减小。然而，T–AOC 水平以及总 SOD、CuZnSOD、MnSOD、GST 活力各处理间差异不显著（$P > 0.05$）。

百惠康对生长中期草鱼肠道免疫屏障功能的影响

（1）抗菌能力

肠道免疫屏障是鱼类肠道屏障结构的另一重要组成部分，其功能依赖于肠道的非特异性免疫和特异性免疫应答能力。百惠康替代鱼粉对生长中期草鱼肠道免疫功能的影响见表 9。

前肠：溶菌酶活力随百惠康替代水平上升而逐渐上升，在替代水平为 40%、60% 达到最大，随后显著下降（$P < 0.05$）。补体 C3 在百惠康替代鱼粉 40%~80% 组显著

合作试验研究报告

表8 百惠康对生长中期草鱼肠道氧化损伤和抗氧化能力的影响

百惠康替代比例	0%	20%	40%	60%	80%	100%
前肠						
MDA	30.38 ± 0.95^{d}	26.65 ± 0.49^{c}	19.36 ± 1.38^{a}	20.74 ± 0.59^{a}	24.50 ± 1.97^{b}	29.06 ± 1.74^{d}
PC	4.47 ± 0.15^{b}	3.79 ± 0.25^{a}	3.77 ± 0.11^{a}	4.09 ± 0.31^{a}	4.47 ± 0.38^{b}	4.95 ± 0.47^{c}
T–AOC	1.27 ± 0.07^{ab}	1.33 ± 0.05^{ab}	1.37 ± 0.02^{b}	1.35 ± 0.06^{ab}	1.29 ± 0.11^{ab}	1.25 ± 0.12^{a}
T–SOD	13.33 ± 1.10^{a}	13.93 ± 0.45^{a}	14.43 ± 0.94^{a}	14.48 ± 0.93^{a}	13.93 ± 0.96^{a}	13.47 ± 1.03^{a}
CuZnSOD	6.55 ± 0.48^{a}	7.26 ± 0.32^{ab}	7.65 ± 0.56^{b}	7.53 ± 0.69^{b}	7.25 ± 0.69^{ab}	7.07 ± 0.55^{ab}
MnSOD	6.78 ± 1.03^{a}	6.67 ± 0.48^{a}	6.79 ± 0.46^{a}	6.95 ± 0.33^{a}	6.68 ± 0.37^{a}	6.40 ± 0.61^{a}
CAT	1.84 ± 0.13^{a}	2.35 ± 0.23^{b}	2.45 ± 0.22^{b}	2.41 ± 0.17^{b}	2.26 ± 0.22^{b}	1.92 ± 0.19^{a}
GPx	118.59 ± 6.30^{ab}	127.99 ± 9.54^{bc}	135.67 ± 9.31^{c}	129.47 ± 8.64^{bc}	121.16 ± 10.20^{ab}	110.88 ± 10.31^{a}
GST	82.96 ± 4.58^{ab}	85.08 ± 6.39^{ab}	88.61 ± 5.82^{b}	86.17 ± 6.12^{ab}	84.22 ± 5.86^{ab}	80.45 ± 5.41^{a}
GSH	4.97 ± 0.32^{a}	5.70 ± 0.35^{bc}	6.23 ± 0.49^{cd}	6.45 ± 0.48^{d}	5.97 ± 0.42^{bcd}	5.65 ± 0.45^{b}
中肠						
MDA	32.70 ± 1.53^{d}	25.07 ± 1.71^{c}	19.12 ± 1.07^{a}	21.35 ± 1.83^{b}	24.25 ± 1.72^{c}	33.25 ± 1.66^{d}
PC	5.02 ± 0.33^{cd}	4.61 ± 0.38^{bc}	3.92 ± 0.37^{a}	4.39 ± 0.37^{b}	4.83 ± 0.26^{bc}	5.44 ± 0.45^{d}
T–AOC	1.32 ± 0.10^{a}	1.38 ± 0.09^{a}	1.42 ± 0.14^{a}	1.41 ± 0.08^{a}	1.38 ± 0.10^{a}	1.36 ± 0.12^{a}
T–SOD	14.49 ± 0.78^{a}	14.77 ± 0.67^{a}	14.89 ± 0.47^{a}	14.82 ± 0.70^{a}	14.81 ± 0.93^{a}	14.49 ± 0.94^{a}
CuZnSOD	7.89 ± 0.27^{a}	7.97 ± 0.26^{a}	8.03 ± 0.40^{a}	7.98 ± 0.15^{a}	7.95 ± 0.45^{a}	7.79 ± 0.73^{a}
MnSOD	6.60 ± 0.69^{a}	6.80 ± 0.66^{a}	6.86 ± 0.35^{a}	6.84 ± 0.74^{a}	6.86 ± 0.77^{a}	6.70 ± 0.96^{a}
CAT	1.77 ± 0.17^{a}	2.07 ± 0.18^{bc}	2.34 ± 0.21^{d}	2.21 ± 0.21^{cd}	2.09 ± 0.17^{bc}	1.95 ± 0.12^{ab}
GPx	127.51 ± 5.94^{a}	132.20 ± 9.94^{a}	138.77 ± 13.44^{a}	137.99 ± 13.58^{a}	134.84 ± 8.84^{a}	128.64 ± 12.25^{a}
GST	71.21 ± 6.54^{a}	81.49 ± 7.06^{bc}	91.45 ± 6.98^{d}	88.84 ± 7.42^{cd}	78.05 ± 6.99^{ab}	72.43 ± 5.98^{a}
GSH	5.62 ± 0.41^{a}	5.85 ± 0.35^{a}	6.00 ± 0.55^{a}	5.95 ± 0.40^{a}	5.74 ± 0.24^{a}	5.62 ± 0.33^{a}
后肠						
MDA	27.76 ± 2.22^{d}	23.04 ± 1.61^{c}	17.73 ± 0.45^{a}	19.85 ± 1.10^{b}	23.18 ± 1.39^{c}	26.77 ± 2.16^{d}
PC	4.03 ± 0.30^{cd}	3.52 ± 0.15^{ab}	3.40 ± 0.29^{a}	3.68 ± 0.27^{abc}	3.81 ± 0.36^{bc}	4.23 ± 0.33^{d}
T–AOC	1.35 ± 0.13^{a}	1.38 ± 0.08^{a}	1.44 ± 0.09^{a}	1.43 ± 0.11^{a}	1.38 ± 0.11^{a}	1.33 ± 0.10^{a}
T–SOD	15.90 ± 0.79^{a}	16.18 ± 0.67^{a}	16.60 ± 0.58^{a}	16.54 ± 0.82^{a}	16.42 ± 0.52^{a}	16.39 ± 0.78^{a}
CuZnSOD	7.56 ± 0.55^{a}	7.69 ± 0.41^{a}	7.86 ± 0.50^{a}	7.86 ± 0.40^{a}	7.76 ± 0.38^{a}	7.74 ± 0.42^{a}
MnSOD	8.35 ± 0.78^{a}	8.49 ± 0.50^{a}	8.74 ± 0.66^{a}	8.68 ± 0.81^{a}	8.66 ± 0.53^{a}	8.65 ± 0.57^{a}
CAT	2.10 ± 0.19^{bc}	2.29 ± 0.22^{cd}	2.42 ± 0.16^{d}	2.15 ± 0.19^{c}	1.91 ± 0.09^{b}	1.72 ± 0.14^{a}
GPx	110.17 ± 9.65^{ab}	118.12 ± 10.48^{bc}	122.69 ± 10.21^{c}	119.22 ± 8.14^{bc}	117.83 ± 9.51^{bc}	104.81 ± 3.88^{a}
GST	84.15 ± 7.13^{a}	91.46 ± 8.89^{a}	93.92 ± 7.86^{a}	92.87 ± 7.58^{a}	90.34 ± 7.44^{a}	86.97 ± 6.00^{a}
GSH	4.29 ± 0.18^{a}	5.31 ± 0.40^{b}	6.47 ± 0.51^{e}	6.09 ± 0.32^{de}	5.85 ± 0.44^{cd}	5.41 ± 0.47^{bc}

数据均采用平均数±标准差表示（每个处理3个重复，每个重复2尾鱼），同行上标为不同小写字母表示差异显著（$P < 0.05$）。PC，蛋白羰基（nmol/mg 蛋白）；MDA丙二醛（nmol/g组织）；T-AOC，总抗氧化能力（U/mg 蛋白）；CuZnSOD，铜锌超氧化物歧化酶（U/mg 蛋白）；MnSOD，锰超氧化物歧化酶（U/mg 蛋白）；CAT，过氧化氢酶（U/mg 蛋白）；GPx，谷胱甘肽过氧化物酶（U/mg 蛋白）；GST，谷胱甘肽硫转移酶（U/mg 蛋白）；GSH，谷胱甘肽（mg/g蛋白）。

高于其余各组（$P < 0.05$）。补体 C4 含量随百惠康替代水平上升而逐渐上升，在替代水平为 60% 时达到最大，随后逐渐下降。IgM 含量随百惠康替代水平上升而显著上升，在替代水平为 60% 时达到最大，随后显著下降（$P < 0.05$）。

中肠：溶菌酶活力在百惠康替代鱼粉 20%~60% 组最高，0% 和 100% 替代组最低（$P < 0.05$）。补体 C3、补体 C4、IgM 含量均随百惠康替代水平上升而逐渐上升，并在替代水平为 60% 时达到最大（$P < 0.05$），随后逐渐下降。

后肠：溶菌酶含量随百惠康替代水平上升而显著上升，在替代水平为 60% 时达到最大，随后显著下降（$P < 0.05$）。补体 C3、补体 C4、IgM 含量随百惠康替代水平上升而逐渐上升，并在替代水平为 60% 时达到最大（$P < 0.05$），随后逐渐下降。

（2）炎症反应

鱼类肠道中促炎、抗炎相关细胞因子的表达水平，也是反映其肠道健康的重要指标。百惠康替代鱼粉对生长中期草鱼肠道细胞因子表达水平的影响见表 10。

百惠康对生长中期草鱼肠道微生物屏障功能的影响

肠道有益菌群和有害菌群的平衡对维持

表9 不同水平百惠康对生长中期草鱼血清、肠道免疫指标的影响

百惠康替代比例	0%	20%	40%	60%	80%	100%
前肠						
溶菌酶	107.44 ± 3.15^{a}	162.14 ± 15.24^{c}	188.87 ± 18.60^{d}	186.01 ± 5.12^{d}	163.41 ± 12.65^{c}	143.45 ± 5.13^{b}
补体C3	22.13 ± 1.69^{a}	24.29 ± 2.40^{a}	26.80 ± 1.57^{b}	29.11 ± 2.21^{b}	27.81 ± 1.86^{b}	24.41 ± 1.93^{a}
补体C4	5.13 ± 0.47^{a}	5.49 ± 0.31^{ab}	5.92 ± 0.35^{cd}	6.22 ± 0.46^{d}	5.74 ± 0.18^{bc}	5.27 ± 0.10^{a}
IgM	47.46 ± 4.14^{a}	58.81 ± 3.88^{b}	66.25 ± 3.65^{c}	72.75 ± 3.03^{d}	63.08 ± 2.08^{c}	58.32 ± 4.32^{b}
中肠						
溶菌酶	108.13 ± 5.18^{a}	160.95 ± 13.08^{c}	166.40 ± 11.73^{c}	165.39 ± 10.30^{c}	137.02 ± 4.63^{b}	105.79 ± 7.05^{a}
补体C3	23.21 ± 1.78^{a}	25.06 ± 2.20^{ab}	26.94 ± 2.34^{b}	27.47 ± 2.58^{b}	26.00 ± 1.76^{b}	24.91 ± 1.37^{ab}
补体C4	4.80 ± 0.42^{a}	6.57 ± 0.63^{b}	7.35 ± 0.69^{cd}	7.68 ± 0.47^{d}	7.19 ± 0.30^{bcd}	6.71 ± 0.64^{bc}
IgM	47.65 ± 3.51^{a}	61.52 ± 3.11^{b}	69.19 ± 9.75^{cd}	73.44 ± 4.87^{d}	64.14 ± 5.54^{bc}	59.41 ± 5.05^{b}
后肠						
溶菌酶	111.54 ± 3.85^{a}	138.80 ± 10.91^{b}	153.76 ± 9.25^{c}	168.74 ± 13.52^{d}	139.99 ± 12.58^{b}	117.58 ± 8.15^{a}
补体C3	22.89 ± 1.97^{a}	24.00 ± 1.90^{ab}	24.93 ± 1.82^{ab}	25.37 ± 1.98^{b}	24.02 ± 1.63^{ab}	23.22 ± 1.80^{ab}
补体C4	6.88 ± 0.17^{a}	7.15 ± 0.20^{ab}	7.45 ± 0.46^{b}	7.63 ± 0.55^{b}	7.19 ± 0.18^{ab}	6.85 ± 0.62^{a}
IgM	52.76 ± 3.52^{a}	61.79 ± 9.29^{ab}	66.36 ± 3.26^{bc}	72.13 ± 9.32^{c}	64.65 ± 9.11^{bc}	61.41 ± 8.34^{ab}

数据均采用平均数±标准差表示（每个处理3个重复，每个重复2尾鱼），同行上标为不同小写字母表示差异显著（P < 0.05）。LZ，溶菌酶（U/mg蛋白）；C3，补体C3（mg/g蛋白）；C4，补体C4（mg/g蛋白）；IgM，免疫球蛋白M（mg/g蛋白）。

表10 百惠康对生长中期草鱼肠道促炎、抗炎细胞因子表达水平的影响

百惠康替代比例	0%	20%	40%	60%	80%	100%
前肠						
TNF–α	1.02 ± 0.22^{b}	0.90 ± 0.26^{ab}	0.73 ± 0.16^{a}	0.72 ± 0.14^{a}	0.77 ± 0.19^{ab}	0.85 ± 0.25^{ab}
IL–1β	1.03 ± 0.27^{b}	0.83 ± 0.15^{ab}	0.79 ± 0.12^{ab}	0.76 ± 0.15^{a}	0.80 ± 0.18^{ab}	0.94 ± 0.28^{ab}
TGF–β1	1.01 ± 0.13^{a}	1.23 ± 0.33^{abc}	1.40 ± 0.40^{bc}	1.60 ± 0.30^{c}	1.43 ± 0.17^{bc}	1.09 ± 0.36^{ab}
IL–10	1.02 ± 0.24^{a}	1.36 ± 0.29^{ab}	1.55 ± 0.38^{b}	1.60 ± 0.31^{b}	1.33 ± 0.23^{ab}	1.16 ± 0.25^{a}
中肠						
TNF–α	1.02 ± 0.24^{c}	0.79 ± 0.17^{ab}	0.74 ± 0.15^{ab}	0.63 ± 0.09^{a}	0.76 ± 0.18^{ab}	0.93 ± 0.18^{bc}
IL–1β	1.03 ± 0.27^{b}	0.86 ± 0.21^{ab}	0.80 ± 0.17^{ab}	0.75 ± 0.09^{a}	0.82 ± 0.15^{ab}	0.87 ± 0.12^{ab}
TGF–β1	1.02 ± 0.22^{a}	1.17 ± 0.24^{ab}	1.24 ± 0.22^{ab}	1.35 ± 0.22^{b}	1.19 ± 0.22^{ab}	1.01 ± 0.26^{a}
IL–10	1.03 ± 0.26^{a}	1.26 ± 0.59^{a}	1.38 ± 0.30^{a}	1.48 ± 0.23^{a}	1.48 ± 0.39^{a}	1.16 ± 0.32^{a}
后肠						
TNF–α	1.00 ± 0.08^{b}	0.84 ± 0.23^{ab}	0.76 ± 0.12^{a}	0.68 ± 0.16^{a}	0.70 ± 0.15^{a}	0.80 ± 0.13^{a}
IL–1β	1.05 ± 0.22^{b}	0.78 ± 0.14^{ab}	0.64 ± 0.23^{a}	0.51 ± 0.30^{a}	0.77 ± 0.29^{ab}	1.05 ± 0.36^{b}
TGF–β1	1.01 ± 0.14^{a}	1.22 ± 0.23^{ab}	1.35 ± 0.32^{ab}	1.51 ± 0.32^{b}	1.42 ± 0.29^{b}	1.30 ± 0.31^{ab}
IL–10	1.01 ± 0.17^{a}	1.21 ± 0.16^{abc}	1.41 ± 0.19^{bc}	1.57 ± 0.48^{c}	1.33 ± 0.41^{abc}	1.09 ± 0.21^{ab}

数据均采用平均数±标准差表示（每个处理3个重复，每个重复2尾鱼），同行上标为不同小写字母表示差异显著（P < 0.05）

肠道健康和免疫功能的正常非常重要。乳酸杆菌是鱼类肠道重要的有益菌，而鱼类肠道中嗜水气单胞菌和大肠杆菌大量增殖将导致疾病发生。百惠康替代鱼粉对生长中期草鱼肠道微生物水平的影响见表 11。如表 11 所示，肠道中有害菌大肠杆菌、嗜水气单胞菌数量随百惠康替代鱼粉水平上升而显著下降，在替代水平为 60% 是达到最低，随后显著上升（P < 0.05）。肠道中有益菌乳酸杆菌数量随百惠康替代鱼粉水平上升而显著上升，在替代水平为 60% 时达到最高，随后显著下降（P < 0.05）。

生长中期草鱼饲粮中百惠康的适宜比例

以不同标识确定的生长中期草鱼百惠康替代鱼粉适宜比例见图 1。由图 1 可知，以增重百分比和抵抗赤皮、烂鳃以及前、中、后肠肠炎病的能力为标识，根据二次回归模型，确定的生长中期草鱼（183–664g）饲粮

表11 百惠康对生长中期草鱼肠道微生物数量（log cfu/g 肠内容物）的影响

百惠康替代比例	0%	20%	40%	60%	80%	100%
大肠杆菌	7.38 ± 0.00^{d}	7.33 ± 0.00^{c}	7.23 ± 0.01^{b}	7.17 ± 0.02^{a}	7.22 ± 0.01^{b}	7.31 ± 0.02^{c}
嗜水气单胞菌	7.36 ± 0.01^{d}	7.14 ± 0.02^{c}	7.06 ± 0.02^{b}	6.95 ± 0.01^{a}	7.02 ± 0.06^{b}	7.32 ± 0.03^{d}
乳酸杆菌	6.64 ± 6.64^{a}	6.89 ± 0.05^{b}	7.06 ± 0.03^{c}	7.17 ± 0.02^{d}	7.03 ± 0.05^{c}	6.89 ± 0.04^{b}

数据均采用平均数±标准差表示（每个处理3个重复，每个重复3尾鱼），同行上标为不同小写字母表示差异显著（P < 0.05）

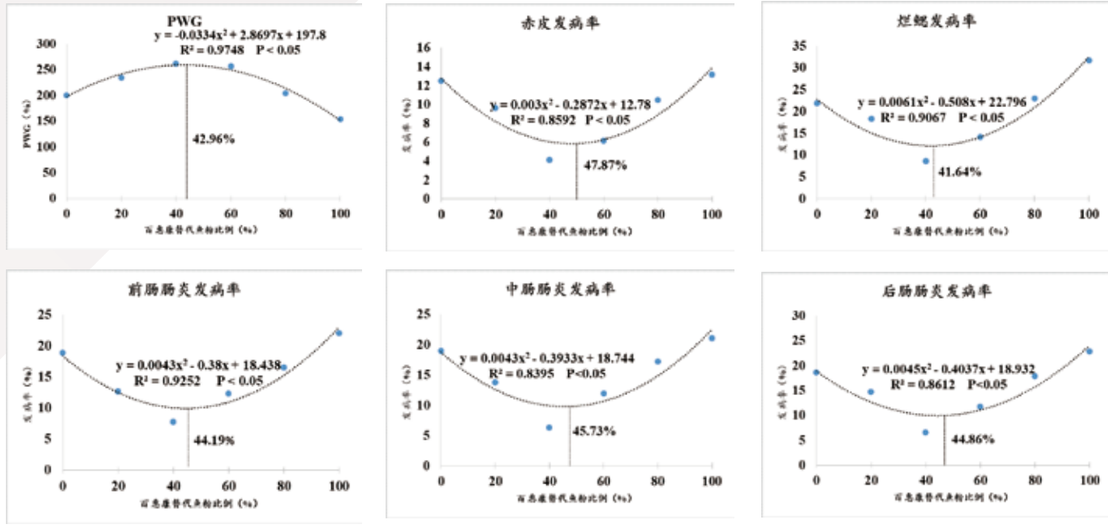

图1不同标识确定的生长中期草鱼百惠康最适比例

中在以 4% 鱼粉为对照的基础上，百惠康替代鱼粉最适水平分别为 42.96%、47.87%、41.64%、44.19%、45.73%、44.86%。以上结果表明，除烂鳃发病率外，根据赤皮、肠炎抗病力确定的最适百惠康替代鱼粉水平比根据生长性能确定的最适替代水平高，表明鱼体在抵抗赤皮、肠炎时饲粮中需要添加更多的百惠康。

结论

在本试验条件下，根据试验结果，得出如下结论：

（1）饲粮中适宜水平的酵母培养物百惠康替代鱼粉促进了鱼类生长，并提高了鱼类抵抗“肠炎、赤皮、烂鳃”的能力。以增重百分比和抵抗赤皮、烂鳃以及前、中、后肠肠炎病的能力为标识，根据二次回归模型，确定的生长中期草鱼（183–664g）饲粮中在对照组为 4% 鱼粉的基础上百惠康替代鱼粉水平分别为 42.96%、47.87%、41.64%、44.19%、45.73%、44.86%。

（2）适宜水平的百惠康替代鱼粉促进鱼类生长可能与其提高了鱼类的饲料蛋白质和脂肪表观消化率、增强了肠道健康和机体健康有关。

（3）进一步研究发现：适宜水平的百惠康替代鱼粉增强生长中期草鱼肠道健康与以下三方面有关：① 通过提高部分抗氧化酶活力和非酶抗氧化物质 GSH 含量提高抗氧化能力，降低氧化损伤，增强了肠道物理屏障功能，且对前肠抗氧化能力的提高作用大于中肠和后肠；② 通过提高鱼类肠道抗菌物质溶菌酶活力和补体 C3、C4 以及免疫球蛋白 IgM 含量，同时上调肠道抗炎细胞因子 TGF–β1 和 IL–10（中肠除外）的基因表达以及下调促炎细胞因子 TNF–α 和 IL–1β 基因表达，减缓了炎症反应，增强了肠道免疫屏障功能；③促进有益菌（乳酸杆菌）生长，抑制有害菌（大肠杆菌和嗜水气单胞菌）生长，改善了肠道微生物屏障功能。

（4）适宜水平的百惠康替代鱼粉增强生长中期草鱼机体健康与以下两方面有关：① 通过提高主要代谢和解毒器官肝脏部分抗氧化酶活力和非酶抗氧化物质 GSH 含量提高抗氧化能力，降低氧化损伤，维持了肝脏的结构完整性；② 通过提高鱼类血清中抗菌物质溶菌酶活力和补体 C3、C4 以及免疫球蛋白 IgM 含量，提高了机体免疫能力。