

文章编号:1000-0615(2007)06-0765-06

木聚糖酶对尼罗罗非鱼钠葡萄糖共转运载体(SGLT₁) mRNA表达的影响

聂国兴^{1,2}, 王俊丽¹, 华雪铭², 黄旭雄², 王修启³, 周洪琪²

(1. 河南师范大学生命科学学院, 河南 新乡 453007;

2. 上海水产大学生命科学与技术学院, 上海 200090;

3. 华南农业大学动物科学学院, 广东 广州 510642)

摘要:以尼罗罗非鱼[体重(106.16 ± 16.77) g]为实验对象,小麦基础饲料为对照,小麦基础饲料中分别添加不同水平的木聚糖酶(0.05%、0.10%、0.15%)作为试验饲料。每个处理设5个重复,每个重复放养40尾雄性尼罗罗非鱼,旨在研究木聚糖酶对尼罗罗非鱼前肠和中肠钠葡萄糖共转运载体(SGLT₁) mRNA表达的影响,从分子水平揭示木聚糖酶促进尼罗罗非鱼生长的机理。饱食投喂,饲养75 d后,每饲料组分别取10尾鱼,尾静脉取血制备血清,测定血糖含量;采用离心柱型总RNA提取试剂盒提取前肠和中肠总RNA,通过RT-PCR对前肠和中肠SGLT₁ mRNA的表达进行相对定量。结果表明,0.05%组、0.10%组和0.15%组前肠SGLT₁ mRNA的相对表达量分别比对照组提高19.28% ($P < 0.05$)、42.17% ($P < 0.01$)和16.87% ($P < 0.05$);对照组尼罗罗非鱼在摄食后2 h血糖仅为5.56 mmol · L⁻¹,0.10%组极显著高于对照组 ($P < 0.01$);0.05%组和0.10%组的增重率较对照组分别提高8.29%、17.45% ($P < 0.01$),0.15%组的增重率与对照组相比没有统计学差异 ($P > 0.05$)。研究结果表明,在小麦基础饲料中适量添加木聚糖酶能显著上调前肠SGLT₁ mRNA的表达,促进葡萄糖吸收,从而提高尼罗罗非鱼的生长速度。

关键词:尼罗罗非鱼;小麦基础饲料;木聚糖酶;钠葡萄糖共转运载体1

中图分类号:S 963

文献标识码:A

Effects of the xylanase on sodium/glucose cotransporter 1 (SGLT₁) mRNA expression of *Oreochromis niloticus*

NIE Guo-xing^{1,2}, WANG Jun-li¹, HUA Xue-ming²,

HUANG Xu-xiong², WANG Xiu-qi³, ZHOU Hong-qi²

(1. College of Life Sciences, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China;

2. College of Aqua-life Science and Technology, Shanghai Fisheries University Shanghai 200090, China;

3. College of Animal Science, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: Wheat is important cereal crop in China. Recently, because of the improvement of science and

收稿日期:2007-01-08

资助项目:河南省重点科技攻关项目(0423030200);河南省教育厅自然科学研究项目(200510476015);河南省动物学重点学科资助项目

作者简介:聂国兴(1971-),男,河南长垣人,博士,副教授,从事水产动物营养与饲料科学研究。TEL:0373-3326441, E-mail: niegx@henannu.edu.cn

通讯作者:周洪琪, Tel:021-65710017, E-mail: hqzhou@shfu.edu.cn

technology, the output of wheat has increased significantly and exceeded the demand in phase and structure. Using wheat as raw material of feed, carrying out transformation and consumption by aquaculture, all of these now possess the resources feasibility. The use of wheat in aquatic feed industry as major energy feed has been restricted because of xylan. This paper displayed the mechanism of xylanase promoting animals' growth at molecular level. Wheat basal diet was control. The tested diets were wheat basal diet added with different levels of xylanase(0.05%, 0.10%, and 0.15% respectively). Each treatment was devised with 5 repeats and each repeat had 40 male *Oreochromis niloticus*. The fish in floating cages were fed to satiation for 75 days. The content of blood glucose in serum of 10 fish from each treat was measured. The total RNA was extracted from the sample's fore-gut and mid-gut with spin column total RNA extract kit. The SGLT₁ expression was relatively quantified by means of RT-PCR. The results showed that, the xylanase could up-regulate SGLT₁ expression of fore-gut, the amount of SGLT₁ mRNA relative expression of 0.05%, 0.10% and 0.15% groups had increased by 19.28% ($P < 0.05$), 42.17% ($P < 0.01$) and 16.87% ($P < 0.05$) over the control. As for the content of blood glucose, the control group was only 5.56 mmol · L⁻¹ when fed 2 hours later, the test groups with xylanase supplement were influenced significantly at the same time. The blood glucose content of 0.10% group was higher significantly than that of the control ($P < 0.01$). The weight gain rate of 0.05% and 0.10% groups were increased by 8.25% and 17.45% respectively ($P < 0.01$), which were higher than that of the control, but it has no significant difference between 0.15% group and the control. So the conclusion is that adding appropriate amount of xylanase to wheat basal diet can significantly up-regulate SGLT₁ expression of fore-gut and serum glucose level, and promote the growth of *Oreochromis niloticus*.

Key words: *Oreochromis niloticus*; wheat basal diet; xylanase; sodium/glucose cotransporter 1 (SGLT₁)

近年来,由于小麦生产科技水平的提高和人民群众膳食结构的改变,小麦出现了阶段性、结构性过剩。但由于小麦木聚糖显著增加养殖鱼类肠道食糜粘度^[1],限制了其作为主体能量饲料在水产饲料工业中的应用,饲用木聚糖酶成功地解决了木聚糖的抗营养问题。木聚糖酶可显著提高以小麦为基础饲料的水产动物的生产性能,但木聚糖酶促进水产动物生长的分子机理国内外尚未见研究报道。本研究在小麦基础饲料中添加木聚糖酶,研究木聚糖酶对尼罗罗非鱼前肠和中肠钠葡萄糖共转运载体 1 (sodium/glucose cotransporter 1, SGLT₁) mRNA 表达的影响,旨在从分子水平揭示木聚糖酶促进尼罗罗非鱼生长的机理。小肠粘膜刷状缘的 SGLT₁ 结合葡萄糖和 Na⁺,形成 Na⁺ - SGLT₁ - 葡萄糖复合物,经主动转运进入细胞,随后由位于基底膜的葡萄糖转运载体 2 (glucose transporter 2, GLUT₂) 将葡萄糖协助转运进入血液^[2]。葡萄糖的吸收虽然由 SGLT₁ 和 GLUT₂ 两种载体共同完成,但 SGLT₁ 是葡萄糖吸收的决定因素。

1 材料与方法

1.1 试验设计

采用单因子浓度梯度法,在基础饲料中分别添加 0.00%、0.05%、0.10%、0.15% 的木聚糖酶。以不添加木聚糖酶的基础饲料组为对照,试验组和对照组各设 5 个平行。

1.2 实验饲料

基础饲料含有 50% 小麦,试验饲料用 HKJ - 218 型环模制粒机制成 $\phi = 2$ mm 的硬颗粒,自然晾干,备用。饲料成分及营养水平见参考文献^[1]。

1.3 饲养管理

实验尼罗罗非鱼来自农业部中捷罗非鱼良种场(河北沧州)。将其饲养于 20 只 1.0 m × 1.0 m × 1.3 m 的池塘浮式网箱中,随机分组。每个网箱放养 40 尾雄性尼罗罗非鱼,初始体重为 (106.16 ± 16.77) g。实验采用饱食方式,每天投喂 4 次(8:30、11:30、14:30、17:30)。实验期间水温为 (29 ± 2.86) °C,各组水质完全一致。每周刷

洗网箱 1 次,防止藻类附着生长。实验时间为 2005 年 7 月 1 日-2005 年 9 月 13 日,共计 75 d。

1.4 样品制备

投喂 2 h 后,从每只网箱随机取 2 尾鱼,尾静脉取血约 3 mL,4 ℃ 放置 4 h,6 000 r · min⁻¹、4 ℃ 离心 15 min,取血清,-20 ℃ 冻存;然后将试验鱼解剖,无菌条件下剪取前肠和中肠,剖开并快速清除内容物,样品放入已灭菌并编号的 PVC 袋内,液氮中保存备用。

1.5 血糖水平测定

取样后 12 h 内,将冻存的血清复溶,用 OLYMPUS-AU640 全自动生化分析仪测定血糖含量。

1.6 增重率测定

实验结束后,各网箱中的实验鱼采用 Ohaus

Corporation ARA520 型电子天平逐条称量体质量,精确到 0.01 g。根据实验鱼初始体质量和终末体质量计算实验鱼的增重率(CtR)。

$CtR = (W_t - W_0) / W_0 \times 100\%$ 式中, W_t 为实验鱼终末体质量(g); W_0 为实验鱼初始体质量(g)。

1.7 引物设计

根据在 NCBI 检索到的虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*) SGLT₁ 基因序列^[3],应用 NCBI 的 Blast 软件搜索其它脊椎动物的 SGLT₁ 序列,经过对比,获得 SGLT₁ 的保守序列。应用 Primer Premier 5.0 软件设计 RT-PCR 引物,用 Oligo 6 软件进行引物评价,引物由上海鼎安生物科技有限公司合成。目的基因 SGLT₁ 和内标基因 β -actin 的引物参数见表 1。

表 1 目的基因 SGLT₁ 和内标基因 β -actin 的引物参数
Tab. 1 Parameters of primer for SGLT₁ and β -actin gene

基因 gene	引物位置 localization	引物序列 primer sequence	扩增区域 amplification area	产物(bp) product
SGLT ₁	76-95	sense 5'-GGTGGATTTGAATGGAATGC-3'	76-424	349
	405-424	antisense 5'-ATCCACGACCATGATGATT-3'		
β -actin	106-125	sense 5'-GTGGGGCGCCCCAGGCACCA-3'	106-645	540
	621-645	antisense 5'-CTTCCTTAATGTCACGCACGATTTC-3'		

1.8 样品总 RNA 提取与反转录

按照离心柱型总 RNA 提取试剂盒(TIANGEN 公司)的说明进行总 RNA 提取。紫外比色法检验总 RNA 的浓度和纯度,琼脂糖凝胶电泳检测总 RNA 的完整性。各样品分别取 5 μ L 的总 RNA (0.2 μ g · μ L⁻¹),按照上海生工 AMV 第 1 链(SK2030)合成试剂盒中的操作步骤,以总 RNA 为模板,在 AMV 逆转录酶(AMV Reverse Transcriptase)作用下,合成 cDNA 第 1 条链,建立各样品的 cDNA,-80℃ 保存备用。

1.9 PCR 扩增

通过预试验,对 PCR 反应条件、循环数及目的基因 SGLT₁ 和内标基因 β -actin 的引物浓度等进行优化。PCR 反应体系包括 2 μ L cDNA 模板,0.5 μ L SGLT₁ 正向引物,0.5 μ L SGLT₁ 反向引物,1 μ L β -actin 正向引物,1 μ L β -actin 反向引物,12.5 μ L 2 × PFU PCR MasterMix (含 0.1 U PFU Polymerase · μ L⁻¹; 500 μ mol dNTP; 20 mmol Tris-HCl, pH 8.3; 100 mmol KCl; 3 mmol MgCl₂; 其它稳定剂和增强剂),补无菌 DDW 使反应体系总体积至 25 μ L,加入 30 μ L 石蜡油。

于 P × 2 Thermal Cycler PCR 仪上进行 SGLT₁ 扩增,程序为:95 ℃ 预变性 5 min;94 ℃ 变性 30 s,58 ℃ 退火 30 s,72 ℃ 延伸 1 min,共进行 28 个循环;72 ℃ 5 min,10 ℃ 保温。PCR 反应完成后,取 15 μ L 扩增产物在 1.5% 经 EB 染色的琼脂糖凝胶上电泳。根据目的基因 SGLT₁ 和 β -actin PCR 产物的灰度比,确定样品中 SGLT₁ mRNA 表达的相对含量。

1.10 数据处理

采用 SPSS 11.5 for windows 进行 one-way ANOVA 分析和 LSD 比较。结果以平均数 ± 标准差(M ± SD)表示。

2 结果

2.1 木聚糖酶对尼罗罗非鱼前肠、中肠 SGLT₁ mRNA 表达的影响 0.05% 组、0.10% 组、0.15% 组前肠 SGLT₁ mRNA 的相对表达量(表 2)分别比对照组提高 19.28% ($P < 0.05$)、42.17% ($P < 0.01$) 和 16.87% ($P < 0.05$)。0.10% 组 SGLT₁ mRNA 的相对表达量显著高于 0.05% 组和 0.15% 组 ($P < 0.05$),0.05% 组和

0.15%组 SGLT₁ mRNA 的相对表达量无显著差异($P>0.05$)(图 1-A)。

0.05%组、0.10%组和 0.15%组中肠 SGLT₁

mRNA 的相对表达量(表 2)分别比对照组提高 11.25%、17.50%和 12.50%,但与对照组均无显著差异($P>0.05$)(图 1-B)。

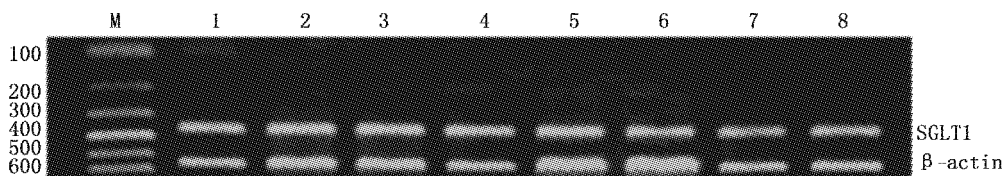


图 1 前肠 SGLT₁ mRNA RT-PCR 产物琼脂糖凝胶电泳图

Fig. 1 Agarose gel electrophoresis of products for SGLT₁ mRNA of fore-gut

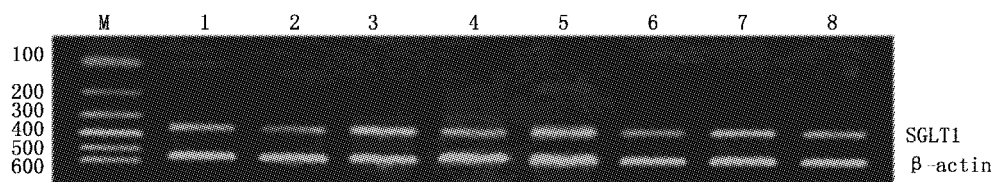


图 2 中肠 SGLT₁ mRNA RT-PCR 产物琼脂糖凝胶电泳图

Fig. 2 Agarose gel electrophoresis of products for SGLT₁ mRNA of mid-gut

M. 100 bp ladder 标准物; 1,5. 对照组; 2,6. 0.05% 木聚糖酶组; 3,7. 0.10% 木聚糖酶组; 4,8. 0.15% 木聚糖酶组

M. 100 bp ladder marker; 1, 5. control group; 2, 6. 0.05% xylanase group; 3, 7. 0.10% xylanase group; 4, 8. 0.15% xylanase group

表 2 尼罗罗非鱼前、中肠 SGLT₁ mRNA 的相对表达量

Tab. 2 The SGLT₁ mRNA relative expression quantity of *Oreochromis niloticus* fore-gut and mid-gut

部位 sites	对照组 control group	试验组 test groups		
		0.05% 木聚糖酶组 0.05% xylanase	0.10% 木聚糖酶组 0.10% xylanase	0.15% 木聚糖酶组 0.15% xylanase
前肠 fore-gut	0.83 ± 0.10 ^{Bc}	0.99 ± 0.12 ^{Bb}	1.18 ± 0.20 ^{Aa}	0.97 ± 0.10 ^{Bb}
中肠 mid-gut	0.80 ± 0.15	0.89 ± 0.16	0.94 ± 0.14	0.90 ± 0.14

注:同一行大写字母不同表示差异极显著($P<0.01$),小写字母不同表示差异显著($P<0.05$)。下同

Notes: Different capital letters in the same line indicate significant difference at $P<0.01$, different letters indicate difference at $P<0.05$ among treatments. The same follow

2.2 木聚糖酶对尼罗罗非鱼血糖水平的影响

对照组尼罗罗非鱼在摄食后 2 h 血糖水平为 5.56 mmol · L⁻¹,小麦基础饲料中添加木聚糖酶对尼罗罗非鱼血清葡萄糖水平有显著影响(表 3)。0.05%组、0.10%组和 0.15%组的血糖水平分别比对照组提高 8.45% ($P>0.05$)、23.20% ($P<0.01$)和 4.86% ($P>0.05$)。0.10%组的血糖水平极显著高于 0.15%组 ($P<0.01$),显著高于 0.05%组 ($P<0.05$),0.05%组和 0.15%组的血糖水平无显著差异 ($P>0.05$)。

小麦基础饲料中添加木聚糖酶,可以显著提高尼罗罗非鱼的增重率。0.05%组和 0.10%组的增重率较对照组分别提高 8.29%、17.45% ($P<0.01$),0.15%组尼罗罗非鱼的增重率虽然比

对照组高,但无统计学差异 ($P>0.05$)。试验组中,0.10%组的增重率极显著高于 0.05%组和 0.15%组 ($P<0.01$),0.05%组和 0.15%组无显著差异 ($P>0.05$)。

3 讨论

3.1 影响 SGLT₁ mRNA 表达的因素

SGLT₁ mRNA 的表达受糖的含量和种类^[4]、Na⁺^[5-7]、IGF(insulin-like growth factors, 胰岛素样生长因子)^[8]、蛋白激酶^[9]、养殖动物的年龄和健康状况^[10-11]等因素的影响。本试验在小麦基础饲料中添加木聚糖酶能上调尼罗罗非鱼前肠和中肠 SGLT₁ mRNA 的表达。

表 3 尼罗罗非鱼的血糖水平与增重率
Tab. 3 The contents of blood glucose of *Oreochromis niloticus* group

	对照组 control	试验组 test groups		
		0.05% 木聚糖酶组 0.05% xylanase	0.10% 木聚糖酶组 0.10% xylanase	0.15% 木聚糖酶组 0.15% xylanase
血糖 (mmol · L ⁻¹) blood glucose	5.56 ± 0.93 ^{Bb}	6.03 ± 0.56 ^{ABb}	6.85 ± 0.95 ^{Aa}	5.83 ± 0.44 ^{Bb}
初始体质量 (g) initial weight	107.89 ± 18.48	106.95 ± 17.23	104.63 ± 15.37	105.17 ± 15.74
终末体质量 (g) final weight	387.31 ± 64.30 ^{Bc}	405.59 ± 80.98 ^{ABb}	422.08 ± 69.35 ^{Aa}	388.42 ± 72.57 ^{Bc}
增重率 (%) weight gate rate	258.24 ± 36.88 ^{Cc}	279.64 ± 40.54 ^{Bb}	303.31 ± 43.32 ^{Aa}	269.33 ± 39.10 ^{B^Cbc}

王修启等^[12]在 1 日龄 AA 肉雏鸡小麦基础饲料中添加 0.10% 木聚糖酶,肠系膜静脉血糖水平显著提高,并且伴随小肠上段 SGLT₁ mRNA 表达的上调,十二指肠 SGLT₁ mRNA 表达量提高 33.30%,空肠 SGLT₁ mRNA 表达量提高 8.21%。Lescale 等^[13]研究发现,反刍动物断奶后,饲料中的全部葡萄糖在胃中发酵,无葡萄糖到达小肠,肠粘膜中 SGLT₁ mRNA 水平显著下降,经 Northern 和 Western 印迹分析,SGLT₁ 信号几乎减少了 4 倍。通过连续的乳类食物喂养,可防止 SGLT₁ 表达的进一步丢失,提示肠道中可吸收葡萄糖增加是 SGLT₁ mRNA 水平升高的主要原因。Zhao 等^[14]对奶牛的研究获得了一致的结果。本试验在尼罗罗非鱼小麦基础饲料中添加 0.10% 木聚糖酶能极显著提高肠道淀粉酶、纤维素酶等糖分解酶活力^[15],肠道中可吸收葡萄糖含量升高,促进了 SGLT₁ mRNA 表达。

Bindslev 等^[16]对蛋鸡的研究表明,提高 Na⁺ 的摄入水平可以上调 SGLT₁ mRNA 表达。Garriga 等^[5]和 Laverty 等^[6]报道,摄入低 Na⁺ 的鸡,重新补盐后其直肠和回肠的 SGLT₁ mRNA 表达可上调。本试验在基础饲料中适量添加木聚糖酶,改变了食糜粘度和食糜成分,提高了细胞膜上离子载体的数量和活性,使离子门控通道(gated channel)开放的机率倍增,从而提高了离子的运输速度和运输量^[17],显著提高尼罗罗非鱼血清 Na⁺ 水平^[18],可能是促进 SGLT₁ mRNA 表达的一个重要原因。

Lane 等^[8]研究发现,在幼鼠饲料中补充 IGF,可以增加 SGLT₁ 表达。本研究在小麦基础饲料添加木聚糖酶,极显著提高尼罗罗非鱼血清中 IGF-I 的水平,0.05% 组、0.10% 组、0.15% 组的血清 IGF-I 水平分别比对照组提高 75.57%、102.46% 和 39.96%^[19]。血清 IGF-I 含量提高,可能是试验组 SGLT₁ mRNA 表达上调的另一重

要原因。

3.2 SGLT₁ mRNA 表达的组织特异性

本试验对照组、0.05% 组、0.10% 组、0.15% 组尼罗罗非鱼中肠 SGLT₁ 相对表达量分别较前肠下降 3.61%、10.10%、20.34% 和 7.78%,说明前肠、中肠消化吸收葡萄糖的能力不同,前肠是尼罗罗非鱼葡萄糖消化吸收的主要部位,与此相适应,肠道中 SGLT₁ mRNA 表达水平由前向后逐渐降低,显示出组织特异性,这与王修启等^[20]对鸡、Kojima 等^[21]对大鼠的研究结果一致,提示不同物种之间存在相似的肠道 SGLT₁ mRNA 表达规律。本试验中,尼罗罗非鱼小麦基础饲料添加木聚糖酶可上调 SGLT₁ mRNA 表达水平,但不影响肠道 SGLT₁ mRNA 表达规律,即随着肠道位置后移,SGLT₁ mRNA 表达量降低。

3.3 木聚糖酶、SGLT₁ mRNA 表达水平与血糖水平

小麦基础饲料中添加木聚糖酶,可将木聚糖分解成较小的片段,减少网状水凝胶的交搭和形成,系水力随着这种分解作用的发生而下降,显著降低肠道食糜粘度,0.05% 组、0.10% 组和 0.15% 组的食糜粘度依次为 13.75cps、12.23cps 和 11.92cps,分别比对照组降低 9.60%、19.59%、21.63% ($P < 0.01$)^[1]。肠道食糜粘度降低后,肠道中淀粉酶、纤维素酶等糖分解酶活力提高,葡萄糖生成量增加,向肠壁的扩散速度加快,是引起血糖水平提高的重要原因;其次,肠道中可吸收葡萄糖及 Na⁺ 增加,血清中 IGF-I 水平显著提高,促进了尼罗罗非鱼肠粘膜上 SGLT₁ mRNA 的表达,肠粘膜上 SGLT₁ 载体蛋白数量增加,提高了葡萄糖的摄取量。

3.4 血糖水平与鱼体生长

鱼类血糖正常含量范围为 2.78 ~ 12.72 mmol · L⁻¹,在此范围内血糖升高表示鱼体消化吸收作用加强^[22]。本试验小麦基础饲料的能量蛋白比为 41.24 kJ · g⁻¹,添加木聚糖酶可以增加

葡萄糖吸收量,减少蛋白质作为能源消耗,促进鱼体生长。鱼体血糖水平应控制在正常范围内,如果血糖水平过高,葡萄糖可能转化为大量脂肪,导致鱼体出现脂肪肝,对生长产生负面影响。

4 结语

小麦基础饲料中适量添加木聚糖酶能上调肠道 SGLT₁ mRNA 表达,促进葡萄糖吸收,提高尼罗罗非鱼的生长速度。木聚糖酶影响 SGLT₁ mRNA 表达的机制及其对 SGLT₁ 转运载体活性的影响有待进一步研究。随着分子生物学技术的发展,基因表达的营养调控必将成为鱼类营养学的研究热点。

试验过程中得到河南科技学院细胞生物学重点实验室马金友博士、张浩博士、王承民硕士的悉心帮助,特致谢忱。

参考文献:

- [1] 聂国兴,王俊丽,朱命炜,等. 小麦基础饲料中添加木聚糖酶对尼罗罗非鱼肠道食糜粘度和绒毛、微绒毛发育的影响[J]. 水产学报,2007,31(1): 54-61.
- [2] Luis R. One-hundred years of inquiry: the mechanism of glucose absorption in the intestine [J]. *Annu Rev Physiol*, 2000,62:939-946.
- [3] Sugiura S H, McDaniel N K, Ferraris R P. In vivo fractional P (i) absorption and NaPi-II mRNA expression in rainbow trout are upregulated by dietary P restriction[J]. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol*, 2003,285(4):R770-781.
- [4] Dyer J, Patrick J B, Soraya P, *et al.* Nutrient regulation of the intestinal Na⁺/Glucose cotransporter (SGLT₁) gene expression [J]. *Biochemical and biophysical research communication*, 1997,230:624-629.
- [5] Garriga C, Planas J M, Moreto M. Aldosterone mediates the changes in hexose transport induced by low sodium intake in chicken distal intestine [J]. *J Physiol*, 2001,535(1): 197-205.
- [6] Laverty G, Bjarnadóttir S, Elbr[™] nd V S, *et al.* Aldosterone suppresses expression of an avian colonic sodium-glucose cotransporter [J]. *Am J Physiol*,2001,281: R1042-1050.
- [7] Barfull A, Garriga C, Tauler A, *et al.* Regulation of SGLT₁ expression in response to Na⁺ intake [J]. *Am J Physiol*,2002,282: R738-743.
- [8] Lane R H, Dvorak B, MacLennan N K, *et al.* IGF alters jejunal glucose transporter expression and serum glucose levels in immature rats [J]. *Am J Physiol*, published August 29, 2002, 10.1152/ajpregu.00172.2002.
- [9] Wright E M, Hirsch J R, Loo D D F, *et al.* Regulation of Na⁺/glucose cotransporters [J]. *J Exp Biol*,1997, 200: 287-293.
- [10] Barfull A, Garriga C, Mitjans M, *et al.* Ontogenetic expression and regulation of Na⁺-D-glucose cotransporter in jejunum of domestic chicken [J]. *Am J Physiol*, 2002, 282: G559-564.
- [11] Dyer J, Wood I S, Palejwala A, *et al.* Expression of monosaccharide transporters in intestine of diabetic humans [J]. *Am J Physiol*, 2002, 282: G241-248.
- [12] 王修启,张兆敏,张磊,等. 日粮中添加木聚糖酶对肉鸡小肠葡萄糖吸收及其转运载体基因表达的影响[J]. 农业生物技术学报,2005,13(4):497-502.
- [13] Lescale-matys L, Dyer J, Scott D, *et al.* Regulation of ovine intestinal Na⁺/glucose co-transporter (SGLT₁) is dissociated from mRNA abundance [J]. *Biochem J*,1993, 291:435-440.
- [14] Zhao F Q, Okine E K, Chris I, *et al.* Glucose transporter gene expression in lactating bovine gastrointestinal tract [J]. *J Anim Sci*, 1998, 76: 2921-2929.
- [15] 聂国兴,明红,张玲,等. 外源木聚糖酶对尼罗罗非鱼消化器官消化酶活力及分布的影响[J]. 华北农学报,2006,21(4):123-130.
- [16] Bindslev N, Hirayama B A, Wright E M. Na⁺/glucose cotransport and SGLT₁ expression in hen colon correlates with dietary Na⁺ [J]. *Comp Biochem Physiol*,1997,118(2):219-227.
- [17] 杨福愉. 生物膜[M]. 北京:科学出版社,2005:144-157.
- [18] 聂国兴,明红,郑俊林,等. 木聚糖酶对尼罗罗非鱼血液生理生化指标的影响[J]. 大连水产学院学报,2007,22(5)361-365.
- [19] 聂国兴,王俊丽,周洪琪. 饲料中添加木聚糖酶对尼罗罗非鱼生长及血清激素水平的影响[J]. 中国水产科学,2007,14(2):249-256.
- [20] 王修启,谭会泽,束刚,等. 鸡肠道 SGLT₁ 和 GLUT₂ mRNA 表达的组织特异性研究[J]. 畜牧兽医学报,2006,37(1):12-17.
- [21] Kojima T, Nishimura M, Yajima T, *et al.* Developmental changes in the regional Na⁺/glucose transporter mRNA along the small intestine of suckling rats [J]. *Comp Biochem Physiol B Biochem Mol Biol*, 1999,122(1):89-95.
- [22] 明红,刘涌涛,杜习翔,等. 木聚糖酶对尼罗罗非鱼生长及血脂、血糖水平的影响[J]. 新乡医学院学报,2006,23(6):556-558.