

doi: 10.3969/j.issn.0490-6756.2018.01.030

限食对树麻雀能量代谢及消化道形态结构的影响

徐兴军, 王卿惠, 王有祥, 田金波, 薛明强, 邵淑丽

(齐齐哈尔大学生命科学与农林学院, 齐齐哈尔 161006)

摘要: 为探讨限食对树麻雀(*Passer montanus*)生理生化指标和消化道形态的影响,按其体重随机分为对照组、半饥饿组和1/4饥饿组进行驯化,驯化结束后测定其生理生化指标和消化道形态变化.研究发现,随着限食程度的加大,半饥饿组和1/4饥饿组的体质量、基础代谢率(Basal metabolic rate, BMR)、体脂质量分数、糖原含量、消化道绒毛高度、宽度及肠壁截面积与对照组相比呈降低趋势,器官鲜质量、消化能、消化率、消化道长度呈升高趋势.表明限食是影响树麻雀消化道形态改变的重要环境因子之一;在限食条件下,树麻雀通过降低体质量,增加摄入能、改变消化道形态结构,消耗体内的能量储备和减少基础能耗来缓解食物短缺的生存压力.

关键词: 树麻雀; 限食; 基础代谢率; 消化道; 糖原

中图分类号: Q954 **文献标识码:** A **文章编号:** 0490-6756(2018)01-0184-07

Influence of diet restriction on the energy metabolism and digestive tract morphology in *Passer montanus*

XU Xing-Jun, WANG Qing-Hui, WANG You-Xiang, TIAN Jin-Bo, XUE Ming-Qiang, SHAO Shu-Li
(College of Life Sciences, Agriculture and Forestry, Qiqihar University, Qiqihar 161006, China)

Abstract: In order to explore the influence of diet restriction on the physiological and biochemical indexes and digestive tract morphology of the tree sparrow (*Passer montanus*). According to body weight, the sparrows were divided into the control group, semi starvation group, and a quarter starvation group, respectively. After hunger domestication, the changes of the physiological and biochemical indexes and digestive tract morphology were determined. The study found that with the increase of food restriction degree, in these semi starvation group and a quarter starvation group, the body weight, Basal metabolic rate (BMR) fraction, body fat mass fraction, glycogen content, the height and width of the gastrointestinal villi, the cross-sectional area of the digestive tract showed a decline trend when compared with the control group, while the fresh weight of organ, digestive energy, digestibility and the length of digestive tract have a trend of increasing. These results indicate that the diet restriction is one of an important environmental factors that affect the morphology of digestive tract in tree sparrow. Under the condition of food restriction, tree sparrows reduce the body weight, increase energy intake, modify the structure of digestive tract, consume energy reserves of the body and reduce energy consumption to alleviate the survival pressure caused by food shortages.

Keywords: *Passer montanus*; Diet restriction; Basal metabolic rate; Digestive tract; Glycogen

收稿日期: 2017-02-16

基金项目: 黑龙江省教育厅科学技术研究项目(12541885)

作者简介: 徐兴军(1969-), 男, 教授, 硕士研究生导师, 主要从事动物生理生态学研究. E-mail: xxj0605@163.com

1 引言

鸟类对环境的适应是鸟类生态学研究的主题,食物资源短缺是鸟类在自然环境中面临的重要问题之一.食物作为重要的影响因子,其质量的差异、易获得程度、分布范围、觅食压力等是影响动物能量获取的重要因素,也是研究动物生理生态学的关键^[1].能量摄入和支出的生理调节是适应环境变化的主要能量学策略,而消化道的形态学变化决定动物对营养物质消化吸收的能力,进而影响动物对能量的获取,导致生长状态的变化.当动物处于饥饿环境时,能量需求较高,动物可通过调节消化道的形态来提高消化率,获得更多的能量,动物消化吸收容纳和处理食物的能力,是限制其能量收支的重要因素^[2].目前,关于限食对小型动物能量代谢及产热方面影响的研究较多,如短期持续限食使树麻雀的体质量、基础代谢率降低,消化能、消化率显著增高^[3];伴随饥饿程度的增加,树麻雀小肠、直肠的长度增加^[4];饥饿使麻雀体内肌糖原和肝糖原含量降低,肌胃、腺胃中的纤维素酶活力增高^[5,6];随机限食使小鼠体质量、体脂质量分数、基础代谢率、胴体和性腺质量降低,活动行为增加^[7],等等.糖原是由多个葡萄糖组成的大分子多糖,是动物机体内糖的贮存形式,肌糖原分解为肌肉自身收缩供给能量,肝糖原分解主要维持血糖浓度,因此,糖原对动物获得生存所需要的能量具有重要意义^[8].

树麻雀(*Passer montanus*)属雀形目(Passeriformes)雀科(Fringillidae),是中国北方地区最常见的鸟类之一.目前,国内关于鸟类的研究主要针对鸟类的代谢产热方面^[9],对限食影响鸟类消化道组织学变化的研究较少,本研究以树麻雀为试验材料,从器官水平、整体水平及显微水平来探究树麻雀对食物资源短缺的适应性,旨在深入了解鸟类适应食物资源短缺条件下的能量学策略,阐明产热和能量代谢调节在动物适应不良环境条件变化中的作用和意义,为进一步了解北方小型鸟类的生存机制提供理论依据.

2 材料与方法

2.1 材料

2.1.1 试验动物树麻雀捕自黑龙江省齐齐哈尔市扎龙国家自然保护区(124°37'E至123°47'E,47°32'N至46°52'N),于齐齐哈尔大学生命科学与农学院动物学实验室饲养.适应饲养1周后按体质量随

机分为I组、II组和III组,组间体质量无明显差异($P>0.05$),每组8只.各驯化组均饲喂谷子,以I组投喂的食量为标准,II组投喂标准量的1/2,III组投喂标准食量的1/4.自然光照,自由取食及饮水,驯化4周.

2.1.2 主要仪器 主要仪器:BS124S电子天平(德国赛多利斯股份公司);MOXAR动物气体代谢分析仪(美国AEI公司);索氏脂肪抽提仪(北京师范大学司南仪器厂);IKA C2000氧弹热量计(德国IKA公司);73-5恒温干燥箱(天津市南郊区东泥沽铁工厂);TGL-16M台式高速冷冻离心机(湖南湘仪实验室仪器开发有限公司);723N可见分光光度计(上海精密科学仪器有限公司);数显恒温水浴锅DK-S26(上海三发科学仪器有限公司).

2.1.3 主要试剂 乙醚、5%的三氯乙酸溶液、石英砂、0.2%硫酸萘酮溶液、标准葡萄糖溶液、生理盐水、75%酒精、80%酒精、90%酒精、95%酒精、无水乙醇、二甲苯、纯蜡、蛋白甘油、苏木精染液、盐酸酒精混合液、伊红染液、中性树胶等.

2.2 测定指标及方法

2.2.1 体质量及器官质量的测定 体质量和各器官组织鲜质量用BS124S电子天平测量,精确到0.01g.驯化试验开始后分别测定3组树麻雀的初始体质量;驯化期间每周测定1次体质量,驯化结束时测定3组树麻雀的最终体质量及主要器官质量.

2.2.2 基础代谢率的测定 BMR是维持动物正常生理反应和机体机制的最小产热速率,是动物维持身体各部分基本功能所需要的最小能量值^[10,11].试验采取动物气体代谢分析仪测量树麻雀的BMR,每隔7d测定1次,测量前先将树麻雀禁食4h,称量各只树麻雀的体质量,精确至0.01g.测定开始前,提前2h将氧气和二氧化碳分析仪打开预热,对其进行标定,硬件与软件标定完成后分别将树麻雀放入标好编号的4个呼吸室内适应1h,待树麻雀呼吸稳定后开始进行测量,记录每分钟的耗氧量,共测定30min的耗氧量,分别取5个连续稳定的数值进行计算.

2.2.3 摄入热量值及消化率的测定 采用全收粪法^[12],用氧弹量热仪对饲料和粪便进行热量测定.摄入能=摄入干物质质量×食物热值;粪便能=粪便干质量×粪便热值;消化能=摄入能-粪便能;消化率(%)=消化能(kJ/d)/摄入能(kJ/d)×100.

2.2.4 体脂质量分数的测定 采取索氏抽提法^[10].体脂质量分数=(胴体干质量-抽提后不含

体脂的胴体干质量)/个体质量。

2.2.5 消化道质量与长度的测定 解剖后取出消化道各器官,分离出大肠、小肠、12 指肠、直肠,剔除肠系膜及脂肪组织,各部平展为自然状态下最大长度,用游标卡尺(精度 $\pm 1\text{mm}$)测定长度^[13],用剪刀将各器官纵剖开,在生理盐水中清洗以除去肠道内容物滤纸吸干生理盐水,用电子天平称量各器官鲜质量。

2.2.6 糖原含量的测定 肌糖原、肝糖原采取硫酸蒽酮测定法^[14]。

2.2.7 消化道绒毛长度、绒毛宽度、粘膜层厚度及肠壁截面积的测定 采用石蜡切片法对树麻雀消化道组织进行制片^[15],应用 Nikon 显微成像系统在 10×40 倍视野对消化道组织的绒毛高度、绒毛宽度、粘膜层厚度、肠壁截面积进行测量。

2.3 数据分析

用 SPSS 软件进行数据统计分析。体质量、器

官质量、基础代谢率、体脂质量分数、糖原含量、消化道长度均采用一元方差检测组间差异;驯化因素对体质量、热量值、基础代谢率等的影响采用 SPSS 软件多重比较 LSD 进行分析。

3 结果与分析

3.1 各处理树麻雀的体质量和体脂质量分数及器官质量

驯化开始时,3 组树麻雀的体质量间无明显差异,驯化至第 1 周结束时,I 组体质量小幅增加,而 II 组、III 组体质量均呈降低趋势,II 组、III 组体质量与 I 组间的差异极显著($P < 0.01$);II 组体质量在驯化 1~3 周大幅降低,而 III 组体质量在驯化 3~4 周大幅降低,II 组、III 组体质量在第 4 周驯化结束时比初始体质量分别减少 1.63g、3.08g,3 组树麻雀体质量组间差异均极显著($P < 0.01$)(表 1)。

表 1 各处理组树麻雀的体质量

Tab. 1 Body mass of *Passer montanus* in each treatment groups

组别	体质量/g				
	0 周	1 周	2 周	3 周	4 周
I 组	(19.41 \pm 0.03)aA	(19.49 \pm 0.04)aA	(19.84 \pm 0.03)aA	(20.20 \pm 0.03)aA	(20.53 \pm 0.03)aA
II 组	(19.39 \pm 0.04)aA	(18.91 \pm 0.05)bB	(18.57 \pm 0.04)bB	(18.01 \pm 0.04)bB	(17.76 \pm 0.03)bB
III 组	(19.48 \pm 0.04)aA	(18.75 \pm 0.04)cC	(18.34 \pm 0.04)cC	(17.88 \pm 0.05)cC	(16.40 \pm 0.04)cC

表中同列数据后的字母表示差异显著($P < 0.05$)或极显著($P < 0.01$)。

II 组、III 组、I 组的体脂质量分数分别为 10.82%、9.74%、14.86%,II 组、III 组与 I 组间差异均极显著($P < 0.01$),II 组与 III 组差异不显著($P > 0.05$)。

由表 2 可见,II 组、III 组心脏、肝脏、肺的鲜质量极显著低于 I 组($P < 0.01$);II 组、III 组大肠、小肠、12 指肠、直肠、肌胃的鲜质量极显著高于 I 组($P < 0.01$)。

表 2 各处理组树麻雀器官的鲜质量

Tab. 2 The fresh weight of organs of *Passer montanus* in each treatment groups

组别	鲜质量/mg								
	心脏	肝脏	肺	胰腺	大肠	小肠	12 指肠	直肠	肌胃
I 组	(328.20 \pm 2.25)aA	(699.92 \pm 1.04)aA	(269.30 \pm 2.35)aA	(73.15 \pm 2.25)aA	(111.30 \pm 2.12)aA	(102.93 \pm 2.45)aA	(133.66 \pm 2.67)aA	(30.44 \pm 0.25)aA	(491.25 \pm 2.08)aA
II 组	(271.50 \pm 3.09)bB	(571.80 \pm 2.61)bB	(254.13 \pm 2.65)bB	(68.90 \pm 2.60)bB	(128.32 \pm 2.18)bB	(128.80 \pm 2.63)bB	(162.50 \pm 2.57)bB	(43.70 \pm 0.24)bB	(551.94 \pm 2.66)bB
III 组	(234.71 \pm 5.51)cC	(564.22 \pm 1.73)cC	(226.80 \pm 1.92)cC	(63.70 \pm 1.90)cC	(142.10 \pm 2.00)cC	(136.64 \pm 2.11)cC	(171.10 \pm 1.75)cC	(53.22 \pm 0.19)cC	(580.80 \pm 3.43)cC

表中同列数据后的字母表示差异显著($P < 0.05$)或极显著($P < 0.01$)。

3.2 各处理树麻雀的基础代谢率

在限食驯化过程中,限食程度的大小对基础代谢率有显著的影响,随着驯化时间的延长,I 组呈

小幅增高趋势,II 组、III 组在驯化 2~4 周大幅度降低,在第 4 周驯化结束时达到最小值,与第 1 周相比分别降低 0.42 mL/(g·h)、0.38 mL/(g·h),3

组间的差异均极显著($P < 0.01$)(表 3).

表 3 各处理组树麻雀的基础代谢率

Tab. 3 Basal metabolic rate of *Passer montanus* in each treatment groups

组别	基础代谢率/(mL·g ⁻¹ ·h ⁻¹)				
	0 周	1 周	2 周	3 周	4 周
I 组	(5.18±0.02)aA	(5.21±0.02)aA	(5.28±0.04)aA	(5.28±0.05)aA	(5.32±0.03)aA
II 组	(5.15±0.03)aA	(5.04±0.04)bB	(4.91±0.03)bB	(4.86±0.02)bB	(4.73±0.04)bB
III 组	(5.15±0.03)aA	(4.74±0.03)cC	(4.44±0.04)cC	(4.20±0.04)cC	(4.06±0.04)cC

表中同列数据后的字母表示差异显著($P < 0.05$)或极显著($P < 0.01$).

3.3 各处理树麻雀的消化能和消化率

II 组和 III 组树麻雀的消化能、消化率随着限食驯化时间的延长而增高, II 组、III 组、I 组的消化能分别为 116.63 kJ/g、132.09 kJ/g、82.36 kJ/g, 消化率分别为 89.48%、91.29%、87.44%。3 组消化能、消化率组间差异均极显著($P < 0.01$).

3.4 各处理树麻雀的消化道长度

限食驯化后, 树麻雀大肠、小肠、直肠长度由长到短的顺序为: III 组 > II 组 > I 组, III 组、II 组大肠、小肠、直肠长度与 I 组相比组间差异均极显著($P < 0.01$). 12 指肠长度由长到短的顺序为: III 组 > I 组 > II 组, III 组 12 指肠长度与 I 组、II 组相比组间差异极显著($P < 0.01$)(表 4).

表 4 各处理组树麻雀的消化道长度

Tab. 4 Digestive tract length of *Passer montanus* in each treatment groups

组别	消化道长度(mm)			
	大肠	小肠	12 指肠	直肠
I 组	(19.83±0.03)aA	(130.42±0.04)aA	(12.22±0.02)aA	(8.38±0.04)aA
II 组	(20.18±0.03)bB	(132.38±0.04)bB	(12.17±0.04)aA	(9.15±0.04)bB
III 组	(20.44±0.04)cC	(134.24±0.05)cC	(12.31±0.04)bB	(9.20±0.04)cC

表中同列数据后的字母表示差异显著($P < 0.05$)或极显著($P < 0.01$).

3.5 各处理树麻雀的糖原含量

驯化 4 周后, II 组、III 组肝糖原、肌糖原含量比 I 组分别低 0.33%、0.38% 和 0.24%、0.28%, 3 组肝糖原、肌糖原含量差异均极显著($P < 0.01$), 且肝糖原变化幅度大于肌糖原(表 5).

表 5 各处理组树麻雀的糖原含量

Tab. 5 Glycogen content of *Passer montanus* in each treatment groups

组别	糖原含量(%)	
	肝糖原	肌糖原
I 组	(0.48±0.02)aA	(0.46±0.01)aA
II 组	(0.15±0.01)bB	(0.22±0.01)bB
III 组	(0.10±0.01)cC	(0.18±0.01)cC

表中同列数据后的字母表示差异显著($P < 0.05$)或极显著($P < 0.01$).

3.6 各处理树麻雀的消化道绒毛高度、宽度、粘膜层厚度及肠壁截面积

由表 6 及图 1 可见, 随着限食程度的加大, II 组和 III 组的消化道绒毛高度、宽度及肠壁截面积与 I 组相比呈降低趋势, 且 3 组树麻雀大肠壁截面积、小肠绒毛高度、小肠壁截面积、12 指肠绒毛高度、12 指肠壁截面积组间的差异均极显著($P < 0.01$), II 组大肠绒毛高度、12 指肠绒毛宽度及粘膜层厚度与 I 组相比差异不显著($P > 0.05$), III 组与 I 组、II 组相比差异极显著($P < 0.01$), II 组、III 组与 I 组相比大肠和小肠绒毛宽度差异极显著($P < 0.01$), II 组与 III 组间的差异不显著($P > 0.05$); 而 II 组、III 组的大肠和小肠粘膜层厚度与 I 组相比呈升高趋势, 且 3 组大肠粘膜层厚度、I 组与 II 组小肠粘膜层厚度差异均不显著($P > 0.05$), II 组与 III 组小肠粘膜层厚度差异极显著($P < 0.01$).

表 6 各处理树麻雀的消化道绒毛高度、宽度、粘膜层厚度及肠壁截面

Tab. 6 villus height, villus width, mucosal layer thickness, section area of digestive tract of *Passer montanus* in each treatment groups

类别	I 组	II 组	III 组
大肠绒毛高度(μm)	(542.79 \pm 4.55)aA	(531.11 \pm 4.02)aA	(500.21 \pm 5.93)bB
大肠绒毛宽度(μm)	(68.51 \pm 2.13)aA	(63.27 \pm 1.35)bB	(59.84 \pm 1.15)bB
大肠粘膜层厚度(μm)	(551.03 \pm 3.84)aA	(554.57 \pm 4.27)aA	(560.22 \pm 3.56)aA
大肠壁截面积(mm^2)	(4.28 \pm 0.11)aA	(3.92 \pm 0.09)bB	(3.45 \pm 0.06)cC
小肠绒毛高度(μm)	(580.21 \pm 3.60)aA	(560.13 \pm 4.15)bB	(540.02 \pm 3.37)cC
小肠绒毛宽度(μm)	(68.44 \pm 2.76)aA	(62.59 \pm 1.13)bB	(58.57 \pm 0.05)bB
小肠粘膜层厚度(μm)	(520.66 \pm 4.27)aA	(528.66 \pm 3.42)aA	(540.11 \pm 3.55)bB
小肠壁截面积(mm^2)	(4.80 \pm 0.08)aA	(4.17 \pm 0.06)bB	(3.79 \pm 0.04)cC
12 指肠绒毛高度(μm)	(550.33 \pm 4.04)aA	(540.33 \pm 3.92)bB	(530.85 \pm 3.85)cC
12 指肠绒毛宽度(μm)	(53.28 \pm 0.26)aA	(53.11 \pm 0.05)aA	(50.29 \pm 0.07)bB
12 指肠粘膜层厚度(μm)	(563.81 \pm 3.22)aA	(559.88 \pm 3.25)aA	(543.04 \pm 2.39)bB
12 指肠壁截面积(mm^2)	(5.11 \pm 0.04)aA	(4.76 \pm 0.03)bB	(4.44 \pm 0.06)cC

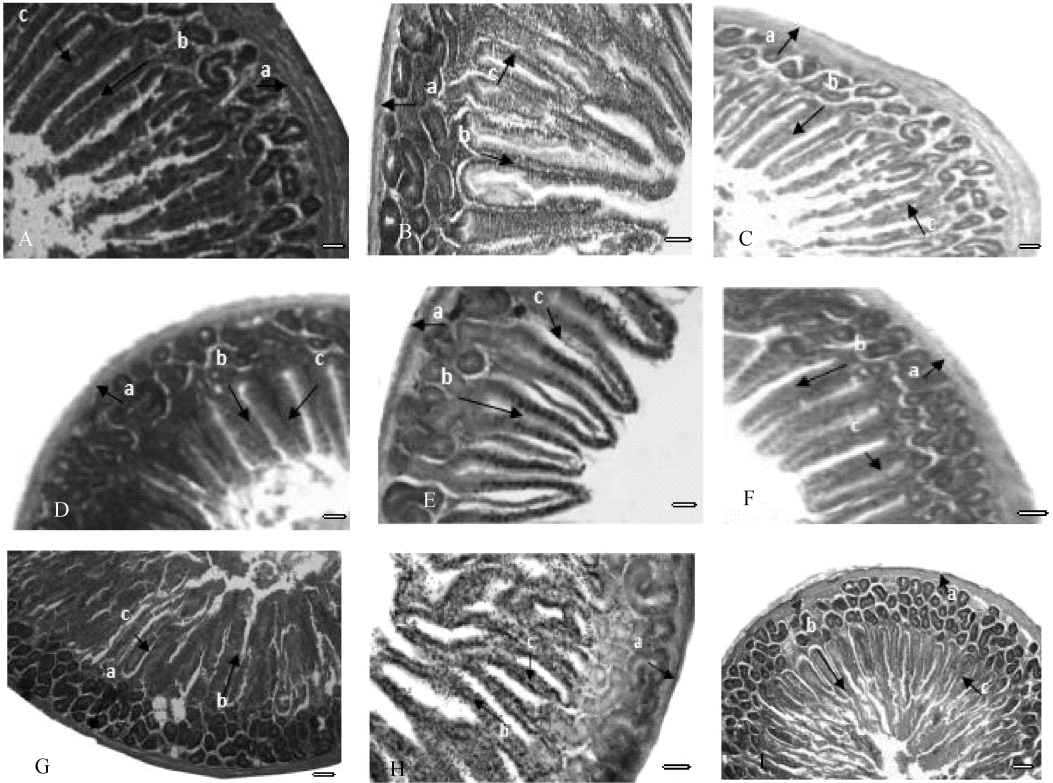
表中同列数据后的字母表示差异显著($P < 0.05$)或极显著($P < 0.01$)。

图 1 各组树麻雀消化道石蜡切片图

A. I 组大肠(HE \times 40); B. II 组大肠(HE \times 40); C. III 组大肠(HE \times 40); D. I 组小肠(HE \times 40); E. II 组小肠(HE \times 40); F. III 组小肠(HE \times 40); G. I 组 12 指肠(HE \times 40); H. II 组 12 指肠(HE \times 40); I. III 组 12 指肠(HE \times 40)注:图中标注 a 代表粘膜层;b 代表绒毛高度;c 代表绒毛宽度.图 A—I 的比例尺均为 100 μm .

Fig. 1 Paraffin sections of the digestive tract of tree sparrows in each groups

4 讨论

体质量取决于能量收支平衡,其变化是反映动物营养状态、能量收支和受环境变化影响最直接的表现形式^[16]。本研究中Ⅲ组、Ⅱ组树麻雀驯化后体质量与驯化前相比分别降低3.08g、1.63g,表明限食导致外源营养物质供应不足,储存于体内的营养物质会被分解利用使体质量下降。有研究表明鸟类的体质量与基础代谢率和体脂质量分数呈正相关^[17]。随着体质量降低,体脂质量分数也降低,这是因为当限食程度增加时,机体会消耗大量的脂肪来补充能量,以应对饥饿胁迫。代谢器官质量的变化对基础代谢率影响较大^[18],Ⅲ组、Ⅱ组树麻雀的基础代谢率、心脏、肝脏、肺、胰腺的鲜质量均显著低于Ⅰ组,原因可能是活性代谢器官代谢率的降低,使树麻雀主动降低器官活力来适应限食压力,表明基础代谢率与肝脏、心脏等器官有一定的相关性,这与柳劲松等^[19]的研究结论相一致。

动物面对饥饿环境的变化表现出不同的能量需求,消化器官形态结构与功能常发生不同程度的代偿性变化,这种结构的改变是适应性产生的结果^[20]。本研究结果表明,随着限食程度的增加,消化道的长度、鲜质量、消化能、消化率不断增大,并且消化道长度较质量的差异更明显,这说明消化道形态的变化主要是由于消化道容积和消化道壁组织结构改变而造成的,消化道长度和质量的增加意味着动物对能量需求的增加^[21]。小肠是消化道最长的器官,也是食物消化和吸收的主要场所,其形态结构的改变能够反映动物在食物资源短缺情况下对能量需求的程度,也反映出鸟类应对生存压力的水平。限食条件下,树麻雀通过增加消化道长度,延长食物在消化道内的滞留时间,从而提高消化速率、消化能,这在高文荣等^[22]的研究中得到了证实。

小肠绒毛高度和宽度等形态学参数是衡量小肠吸收功能的重要指标^[23],小肠绒毛是营养物质吸收的主要部位,其形态结构的变化对营养物质的吸收与利用具有重要意义^[24]。本研究结果表明,小肠绒毛高度最高,12指肠次之,大肠最短,说明小肠是营养物质消化吸收的主要部位,何大乾^[25]的研究也证明了这一点。由于限食导致食物来源不足,树麻雀通过降低小肠绒毛高度,减小肠壁横截面积,使单位面积内有效的绒毛数量增多,扩大了与肠道内食糜的接触面积,进而增加小肠对营养物

质的充分吸收。Ⅱ组、Ⅲ组树麻雀大肠、小肠粘膜层厚度较Ⅰ组显著增加,粘膜层厚度的增加对食物的消化吸收具有促进作用,一方面是因为绒毛内肌纤维数量的增加使绒毛节律性收缩运动加强,进而使肠道对食物的机械消化率提高,另一方面,长绒毛、微绒毛以及褶皱的形态学变化使大肠和小肠的粘膜层厚度增加。12指肠也是消化和吸收的主要场所之一,其形态和组织学特征反映了不同的能量需求和消化策略^[26]。Ⅱ组、Ⅲ组树麻雀12指肠的粘膜层厚度较Ⅰ组显著降低,是因为随着食物量的减少,绒毛高度降低,肠壁细胞更新减少,损失率增加,这种增殖缺陷导致粘膜层厚度降低,这在吕建伟^[27]的研究中得到了证实。

糖原是糖类在动物肝脏和肌肉内的一种储存形式,其贮存量直接影响着动物的能量代谢水平。当需要时,肝糖原可直接分解供能,当肝糖原含量降低到下限时,肌糖原经过一系列的反映与肝糖原共同参与供能,本研究中,Ⅱ组、Ⅲ组树麻雀的肝糖原、肌糖原含量较Ⅰ组极显著降低,降低的主要原因是糖的分解加快,非糖物质合成糖的异生作用减慢造成的。Ⅲ组、Ⅱ组肌糖原含量显著高于肝糖原含量,可能是因为树麻雀在限食初期进行大量的活动来寻找食物,长时间活动后,肝糖原被分解利用,肌细胞的有氧氧化能力增强,导致肌糖原被消耗,当机体后续能量供应不足时,为了维持能量平衡,肝糖原进一步分解成葡萄糖释放到血液,进而导致肝糖原含量的变化幅度较大,这与本实验室以前的研究结果相一致^[5]。

综上所述,树麻雀在限食条件下,通过降低体质量,增加摄入能、改变消化道形态结构,消耗体内的能量储备和减少基础能耗来缓解食物短缺的生存压力。

参考文献:

- [1] 赵志军. 食物限制对黑线仓鼠能量代谢和产热的影响[J]. 兽类学报, 2012, 32: 297.
- [2] Derting T L, Noakes III E B. Seasonal changes in gut capacity in the white-footed mouse (*Peromyscus leucopus*) and meadow vole (*Microtus pennsylvanicus*)[J]. *Can J Zool*, 2011, 73: 243.
- [3] 杨志宏, 柳劲松, 邵淑丽, 等. 短期持续限食对树麻雀体重和基础代谢率的影响及生态学意义[J]. *动物学杂志*, 2010, 45: 119.
- [4] 杨志宏, 柳劲松, 邵淑丽. 饥饿驯化对树麻雀消化

- 道长度和重量的影响[J]. 动物学杂志, 2009, 44: 130.
- [5] 徐兴军, 邵淑丽, 张伟伟, 等. 饥饿条件下麻雀体内糖原含量和基础代谢率的变化[J]. 江苏农业科学, 2012, 40: 348.
- [6] 张伟伟, 邵淑丽, 徐兴军, 等. 饥饿对麻雀体内纤维素酶活性的影响[J]. 安徽农业科学, 2012, 40: 8096.
- [7] 赵志军, 王瑞瑞, 曹静, 等. 随机限食和重喂食小鼠能量收支和生长发育的可塑性[J]. 动物学研究, 2009, 30: 534.
- [8] 王有祥, 徐兴军, 邵淑丽, 等. 光周期对白腰朱顶雀脱支酶活性的影响[J]. 湖南农业大学学报: 自然科学版, 2016, 42: 518.
- [9] 郑蔚虹, 方媛媛, 姜雪华, 等. 白头鹇肝脏和肌肉冬夏两季的代谢产热特征比较[J]. 动物学研究, 2010, 31: 319.
- [10] Al-Mansour M I. Seasonal variation in basal metabolic rate and body composition within individual sanderling bird *calidris alba* [J]. J Biol Sci, 2004, 4: 564.
- [11] Barcelo G, Salinas J, Cavieres G. Thermal history can affect the short-term thermal acclimation of basal metabolic rate in the passerine *Zonotrichia capensis* [J]. J Therm Biol, 2009, 34: 415.
- [12] 汪诗平, 李永宏. 放牧率和放牧时期对绵羊排粪量、采食量和干物质消化率关系的影响[J]. 动物营养学报, 1997, 9: 47.
- [13] 吴梦斯, 赵丽丹, 王润梅, 等. 画眉冬夏两季能量收支和消化道形态特征比较[J]. 生态学杂志, 2015, 34: 1031.
- [14] 徐兴军, 邵淑丽, 张伟伟, 等. 不同食物对麻雀肝糖原和肌糖原含量的影响[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2012, 12: 126.
- [15] 王昌河, 谢振丽, 吕建伟. 动物组织石蜡切片 H-E 染色的快速方法[J]. 生物学通报, 2012, 47: 50.
- [16] Génin F, Perret M. Photoperiod-induced changes in energy balance in gray mouse lemurs [J]. Physiol Behav, 2000, 71: 315.
- [17] Liu J S, Li M, Shao S L. Seasonal changes in thermogenic properties of liver and muscle in tree sparrows *Passer montanus* [J]. Acta Ent Sin, 2008, 51: 1099.
- [18] Zheng W H, Li M, Liu J S, *et al.* Seasonal acclimatization of metabolism in Eurasian tree sparrows (*Passer montanus*) [J]. Comp Biochem Phys A, 2008, 151: 519.
- [19] 柳劲松, 王德华, 孙儒泳. 东北地区黑线仓鼠的代谢产热特征及其体温调节 [J]. 动物学报, 2003, 49: 451.
- [20] Hume I D. Digestive strategies of mammals [J]. Acta Zool Sin, 2002, 48: 1.
- [21] Jimenez A G, Cooper-Mullin C, Calhoun E A, *et al.* Physiological underpinnings associated with differences in pace of life and metabolic rate in north temperate and neotropical birds [J]. J Comp Physiol B, 2014, 184: 545.
- [22] 高文荣, 朱万龙, 余婷婷, 等. 禁食和重喂食对大绒鼠消化道长度与重量的影响[J]. 动物学杂志, 2013, 48: 626.
- [23] 张少帅, 甄龙, 冯京海, 等. 持续偏热处理对肉仔鸡免疫器官指数、小肠形态结构和黏膜免疫指标的影响 [J]. 动物营养学报, 2015, 27: 3887.
- [24] 荆海霞, 俞红贤, 薛乾, 等. 牦牛小肠黏膜结构的发育学变化 [J]. 黑龙江畜牧兽医, 2014, 11: 17.
- [25] 何大乾, 孙国荣, 沈洪民, 等. 肉鹅消化器官生长发育规律初探 [J]. 上海农业学报, 2005, 21: 59.
- [26] Dou Y, Gregersen S, Zhao J, *et al.* Effect of re-feeding after starvation on biomechanical properties in rat small intestine [J]. Med Eng Phys, 2001, 23: 557.
- [27] Lv J, Xie Z, Sun Y, *et al.* Seasonal plasticity of duodenal morphology and histology in *Passer montanus* [J]. Zoomorphology, 2014, 133: 435.