

短期高营养饮食对日本鹌鹑代谢产热及消化道功能的影响

姚雅棋 夏绮 黄婷 李晨星 闻靖* 李铭

温州大学生命与环境科学学院 温州 325035

摘要: 食物的质量对鸟类的代谢产热和消化道功能有重要影响。本研究通过改变食物中脂肪和蛋白质含量的质量百分比来调整食物营养程度,探究食物质量对日本鹌鹑 (*Coturnix japonica*) 产热和消化道功能的影响。将实验动物分为低营养组和高营养组,用实验饲料(低营养饲料:蛋白质 34%,脂肪 8%;高营养饲料:蛋白质 51%,脂肪 15%) 饲喂 14 d 后,测定其体重、基础代谢率 (BMR) 和体脂率,以及肝、心、肾和肌肉的重量及其线粒体状态 4 呼吸 (S4R) 和细胞色素 C 氧化酶 (COX) 活性,小肠重量及其消化酶(纤维素酶、氨基肽酶、淀粉酶和脂肪酶) 活性。结果显示,与低营养组相比,食物质量改变 14 d 以后高营养组动物的体重显著增加、基础代谢率 (BMR) 有升高趋势、体脂率显著增加;肝、心、肾和肌肉的重量和其线粒体状态 4 呼吸 (S4R) 无显著变化,肾细胞色素 C 氧化酶 (COX) 活性显著升高,但是未发现肝、肌肉和心细胞色素 C 氧化酶 (COX) 活性的显著差异;消化道重量和小肠重量均显著降低,单位质量小肠的氨基肽酶和脂肪酶活性显著升高、淀粉酶活性显著降低,整体小肠的纤维素酶、氨基肽酶和淀粉酶活性显著下降。结果表明,当食物质量改变时,鸟类可以通过调整自身代谢产热和消化道功能的方式发生可塑性适应反应,这些调整贯穿整体、器官、细胞和消化酶活性等多个水平。

关键词: 日本鹌鹑; 食物营养; 代谢产热; 消化酶

中图分类号: Q955 文献标识码: A 文章编号: 0250-3263 (2025) 01-032-13

Effects of Short-Term High-Nutrient Foods on Thermogenesis and Digestive Tract Function of Japanese Quails

YAO Ya-Qi XIA Qi HUANG Ting LI Chen-Xing WEN Jing* LI Ming

College of Life and Environmental Sciences, Wenzhou University, Wenzhou 325035, China

Abstract: [Objectives] Food quality is one of the most important factors affecting the thermogenesis and digestion of birds. However, the plasticity of the birds' response to food quality is still unclear. This study aims to understand how birds adapt their thermogenesis and digestion in response to changes in food resources.

基金项目 国家自然科学基金项目 (No. 32171497);

* 通讯作者, E-mail: wenj@wzu.edu.cn;

第一作者介绍 姚雅棋, 女, 学士; 研究方向: 动物生理生态学; E-mail: 20211231133@stu.wzu.edu.cn.

收稿日期: 2024-03-05, 修回日期: 2024-05-28 DOI: 10.13859/j.cjz.202424045 CSTR: 32190.14.cjz.24045

[Methods] We modified the nutrient content of the food by adjusting the percentage of fat and protein (Table 1), 20 male Japanese Quails *Coturnix japonica* were randomly divided into 2 groups: high nutrition group (HNG, $n = 10$) and low nutrition group (LNG, $n = 10$). In this study, we measured body weight, basal metabolic rate (BMR), body fat content, tissue weight (liver, heart, kidney, muscle, and small intestine), mitochondrial state 4 respiration (S4R), cytochrome C oxidase (COX) activity, and the activities of digestive enzymes (cellulase, aminopeptidase, amylase, and lipase) in the small intestine of Japanese Quails. We conducted covariance analysis using body weight as a covariable to analyze BMR and tissue weight. Additionally, we used *t*-test to compare body fat content, S4R and COX activity of tissues, and the activity of small intestinal digestive enzymes in Japanese Quail fed different diets. **[Results]** The results showed that the high nutrition diet significantly increased the body weight and body fat content of Japanese Quails (Fig. 1c), but no increase was found in mitochondrial S4R and COX activity in liver, muscle, and heart (Table 2). Compared with the low nutrition group, the weight of the digestive tract (Fig. 2), and the activities of aminopeptidase and lipase per unit mass of small intestine were significantly increased in the high nutrition group (Figs. 3b, d). However, the activities of amylase were significantly decreased in the high nutrition group (Fig. 3c), while the activities of cellulase, aminopeptidase and amylase in the whole small intestine were significantly decreased (Figs. 3a - c). **[Conclusion]** In conclusion, in order to adapt to changes in food resources and quality, Japanese Quails can develop plastic adaptations by regulating metabolic thermogenesis and digestive tract functions at multiple levels, including whole, organ, cellular, and enzymatic.

Key words: Japanese Quail, *Coturnix japonica*; Food nutrition; Metabolic thermogenesis; Digestive enzymes

表型可塑性 (phenotypic plasticity) 是机体在不同环境中表现不同表型特征的能力 (Piersma et al. 1997)。面对外界环境的变化, 鸟类往往表现出生理、形态、行为及生活史对策等多方面的表型适应性调节 (Piersma et al. 2003)。食物是影响鸟类生存和繁殖的重要环境因子之一, 可以引起鸟类产热、消化道形态及其生理特征的改变 (Zhu et al. 2014, Gao et al. 2016, Shang et al. 2020)。

鸟类专性产热可提供维持其正常生长、细胞完整性和稳定性所必需的热量, 产生于所有的器官中, 如基础代谢率 (basal metabolic rate, BMR) (Swanson et al. 2009, 王德华等 2009)。基础代谢率是恒温动物维持正常生理机制的最低产热速率, 是动物清醒时维持身体各项基本功能所需的最小能量值 (AL-Mansour 2004, McKechnie et al. 2004)。按照食性假说 (food habit hypothesis, FHH) 的预测, 在进化上食物与代谢率存在相关性, 低质量饮食的生物会

降低自身基础代谢率 (McNab 1986)。然而, 关于食物营养对动物基础代谢率影响的相关研究结果不尽相同, 例如, 研究发现紫翅椋鸟 (*Sturnus vulgaris*) (Geluso et al. 1999) 和早期发育时期的斑胸草雀 (*Taeniopygia guttata*) (Bech et al. 2004) 的基础代谢率不随食物营养比例的变化而改变。但是 Piersma 等 (1996) 发现, 红腹滨鹬 (*Calidris canutus*) 从高热量食物转为低热量食物时其基础代谢率显著降低。因此, 目前关于食物营养改变对鸟类代谢产热的影响仍没有定论。基础代谢率的改变往往是骨骼肌以及肝、心、肾和消化道器官在内的代谢活性器官重量和/或组织细胞有氧代谢变化的结果 (Williams et al. 2000)。化学产热是动物整体水平基础代谢率的重要细胞学基础。线粒体状态 4 呼吸 (state 4 respiration, S4R) 又称为线粒体质子漏, 指质子不通过线粒体内膜 F_0F_1 -ATP 合酶中的 F_0 “通道” 进行 ATP 合成, 而直接通过线粒体膜间隙回到基质的过

程,将跨膜存在的质子电化学势能转化为热能。质子漏的耗氧量占线粒体总耗氧量的 1/4 ~ 1/3,是基础代谢率的重要组成部分(Brand et al. 2000)。细胞色素 C 氧化酶 (cytochrome c oxidase, COX) 是线粒体内膜电子传递链上的末端复合物,位于线粒体内膜中,其活性的大小既可以直接反映线粒体的含量又可以代表细胞有氧代谢水平 (Zhou et al. 2016)。来自季节和温度驯化的研究发现,线粒体状态 4 呼吸和细胞色素 C 氧化酶水平的变化是小型鸟基础代谢率差异的重要组织细胞学基础之一 (Zheng et al. 2014a, b, Li et al. 2022)。例如,研究发现以谷物为食的燕雀 (*Fringilla montifringilla*),其基础代谢率显著低于以昆虫为食的树麻雀 (*Passer montanus*),同时燕雀肌肉的线粒体状态 4 呼吸 (S4R) 和细胞色素 C 氧化酶 (COX) 活性也显著低于树麻雀 (柳劲松等 2004)。因此,动物通过升高/降低某些内脏器官的线粒体呼吸作用和质子漏产热等来调节代谢产热作用,线粒体状态 4 呼吸 (S4R) 和细胞色素 C 氧化酶 (COX) 活力都可以在一定程度上表示鸟类在细胞水平上的基础产热能力。但关于食物营养改变对鸟类代谢产热的研究仍相对缺乏,饮食诱导的产热机理也应进一步研究。

食物营养的变化同样会引起消化道表型的可塑性变化 (Karasov 1996, Piersma et al. 1997)。鸟类肠道表型可塑性主要表现在形态和生理等方面,如肠道重量、长度和消化酶活力等指标上 (McWilliams et al. 2001)。作为消化道中最重要的消化阶段,当食物类型发生变化时,动物的小肠可以通过形态和功能的变化来调整自身的消化能力,以便维持能量代谢的稳态平衡。高营养饮食驯化的中华姬鼠 (*Apodemus draco*) (高脂饮食组较低脂饮食组) (Zhu et al. 2014) 和长爪沙鼠 (*Meriones unguiculatus*) (低纤维组较高纤维组) (Pei et al. 2001) 消化道重量显著降低,但提高消化率,减少了能量摄入以维持能量平衡。理论上,如果胃肠道容积保持恒定,高脂肪饮食导致消化道周转速度减慢,

食物滞留时间就会延长,从而提高消化率。此外,高营养(高脂)饮食的 C57BL/6J 小鼠 (*Mus musculus domesticus*) 消化道形态发生显著变化,如肠道长度显著降低 (王家妮等 2021)。这暗示消化道形态的调节对于动物适应能量摄入和消化率的变化具有重要意义 (Derting et al. 1993)。此外,在消化酶的作用下,营养物质在消化道发生水解和吸收,因此消化酶的种类和活性对于机体饮食转换具有重要意义 (Caviedes-Vidal et al. 2000)。淀粉酶和纤维素酶、氨基肽酶以及脂肪酶分别可以反映动物对食物中糖类、蛋白质和脂肪成分消化效率的高低。根据适应性调节假说,消化酶活性与其各自的膳食底物水平成正比 (Diamond et al. 1992),但不同动物的调节结果不同。例如高脂肪饮食下,家麻雀 (*P. domesticus*) 的麦芽糖酶和蔗糖酶等碳水化合物水解酶和氨基肽酶等蛋白质水解酶的活性均显著降低 (Caviedes-Vidal et al. 2000)。但 Rott 等 (2017) 发现,树麻雀的雏鸟肠道消化酶活性不随膳食脂质含量的增高而降低。高淀粉饮食下,日本鹌鹑 (*Coturnix coturnix*) 小肠中的麦芽糖酶和蔗糖酶活性均显著增高 (Kohl et al. 2017)。消化酶活性的可塑性调节程度影响鸟类对不同类型食物的适应程度,从而进一步影响个体的生存和物种的进化 (Brzek et al. 2011)。因此,鸟类膳食水平变化对肠道消化酶活性的影响仍有待进一步研究。

日本鹌鹑原产于亚洲和欧洲 (Minvielle 2004),具有体型小、繁殖率高、觅食能力强等特点。近年来其作为模式动物已经被广泛应用于生物学、畜牧学和生物医学等领域的研究,具有较高的动物学实验价值(王丽莎等 2013)。本研究以日本鹌鹑为研究对象,设立高营养组和低营养组,对其代谢产热和小肠消化功能相关指标进行测定,以验证食物营养影响代谢产热和消化道功能的假设。为揭示小型鸟类应对不同食物营养时的能量代谢适应机制提供基础资料。

1 材料与方法

1.1 实验材料

自浙江苏嘉泽珍禽孵化生态农业公司购买 20 只体重相近、生长状况良好且健康的雄性日本鹌鹑, 编号标记后于温州大学动物驯化室(温度 26 °C, 光周期白昼与黑暗比例为 16L:8D, 自由取食和饮水)单笼(60 cm × 60 cm × 30 cm)饲养 14 d, 以适应上述环境条件。正式实验时将动物随机分为 2 组, 每组 10 只, 分别为高营养组(high nutrition group, HNG: 蛋白质 51%, 脂肪 15%)和低营养组(low nutrition group, LNG: 蛋白质 34%, 脂肪 8%)(表 1), 饲料购买于北京科澳协力有限公司, 实验周期为 14 d。

表 1 饲料的成分比例

Table 1 The proportion of ingredients in the feed

	低营养组 (g) Low nutrition group, LNG	高营养组 (g) High nutrition group, HNG
大豆蛋白粉 Soybean protein flour	33.84	51.18
玉米淀粉 Corn starch	39.81	15.44
石粉 Mineral meal	4.98	4.98
多矿 Minerals premix	0.40	0.40
磷酸铵 Ammonium phosphate	2.99	2.99
蔗糖 Sucrose	1.99	1.99
纤维素 Cellulose	6.97	6.97
多维 Vitamins premix	0.30	0.30
DL-蛋氨酸 DL-Met	0.40	0.40
氯化胆碱 Choline	0.38	0.38
动物油 Animal fat	4.98	9.38
植物油 Vegetable oil	2.99	5.62
合计 Total	100	100

表中数值代表 100 g 饲料中各成分的质量。

The values in Table 1 represent the mass of each component in 100 g of feed.

1.2 体重的测定

实验适应 14 d, 自实验第一天始, 每隔一天使用 BT25S 电子天平(德国 Sartorius, 精确至 0.1 g)测定日本鹌鹑的体重。

1.3 代谢率的测定

每只个体的代谢率以每小时的耗氧量(ml/h)来表示。代谢率采用德国 TSE 公司生

产的开放式氧气分析仪测定, 空气进入呼吸室的流速为 1 L/min, 动物呼出的气体经过滤后, 以 0.38 L/min 的流速通过氧气分析仪取样并收集数据, 由系统配套标准数据分析软件计算分析代谢率。BIC-300 人工气候箱(中国上海, 博迅公司)控制呼吸室的检测温度为 26 °C(热中性区温度范围内)。基础代谢率需要在动物处于吸收后状态且静息条件下测定(AL-Mansour 2004)。日本鹌鹑属于昼行性动物, 因此代谢率的测定均在夜间静息期(23:00 时至翌日 03:00 时)内进行, 课题组前期测定日本鹌鹑昼夜 24 h 代谢率发现, 18:00 ~ 06:00 时之间数值基本稳定。由于代谢开放式氧气分析系统有八个通道, 因此分两批次测定日本鹌鹑的代谢率: 每次随机测定 4 只高营养组个体和 4 只低营养组个体。结合上述背景, 本研究中测定之前将日本鹌鹑禁食 6 h, 放入呼吸室适应 1 h 后, 每隔 5 min 记录 1 次耗氧量, 连续测定 3 h(Wu et al. 2015)。选取 5 个连续稳定最低值计算代谢率。每次实验前后称量体重并测定体温。

1.4 体脂的测定

动物去除肌肉、内脏器官(心、肝、肾、肺和脾)和消化道(胃、小肠、大肠和盲肠), 剩余部分置于恒温干燥箱中(60 °C)烘干至恒重后, 用 BS210S 电子天平(德国 Sartorius, 精确到 0.001 g)称量干重。烘干后的胴体用索氏抽提法测定体脂含量(Firth et al. 1985), 以抽提出的脂肪重量占胴体干重的百分比来计算体脂率。

1.5 线粒体状态 4 呼吸(S4R)和细胞色素氧化酶(COX)的测定

取肝、心、肾三种器官和胸肌组织进行线粒体状态 4 呼吸(S4R)和细胞色素 C 氧化酶(COX)的测定。称取(50 ± 7) mg 组织, 将组织和组织提取液(50 mmol/L 蔗糖、5 mmol/L Tris-HCl、1 mmol/L MgCl₂·6H₂O、0.5 mmol/L EDTA、0.5 mg/mL PBS、pH 7.4)按质量比 1:10 的比例混合, 利用高通量研磨仪得到各组织悬浮液, 冰浴待用。线粒体状态 4 呼吸(S4R)

和细胞色素 C 氧化酶 (COX) 的测定都采用 DW-1 铂氧电极-溶氧仪 (英国 Hansatech)。线粒体状态 4 呼吸 (S4R) 的测定采用 Estabrook (1967) 的方法, 反应温度为 30 °C, 反应杯中的反应液总体积为 2 ml, 肝、心、肾线粒体状态 4 呼吸 (S4R) 的测定反应基质液 1.95 ml, 肌肉线粒体状态 4 呼吸 (S4R) 的测定反应基质液 1.90 ml (225 mmol/L 蔗糖、50 mmol/L Tris-HCl、5 mmol/L MgCl₂, 1 mmol/L EDTA, 5 mmol/L KH₂PO₄, pH 7.2) (柳劲松等 2008, Zhou et al. 2016)。细胞色素 C 氧化酶 (COX) 的测定根据 Sundin 等 (1987) 的方法, 反应温度为 30 °C, 反应杯总体积为 2 ml, 肝、肾、肌肉细胞色素 C 氧化酶 (COX) 的测定反应基质液 1.95 ml, 心细胞色素 C 氧化酶 (COX) 的测定反应基质液 1.975 ml (100 mmol/L KCl、20 mmol/L TES、1 mmol/L EGTA、2 mmol/L MgCl₂、4 mmol/L KH₂PO₄、60 mmol/L BSA, pH 7.2), 并以细胞色素 C 为反应底物。

1.6 小肠和消化道重量的测定

解剖后取出完整的消化道小心去除结缔组织和脂肪后, 分离出胃和小肠。用剪刀将各器官纵剖开, 小心地用生理盐水清洗以去除器官中的内容物, 然后用滤纸吸干生理盐水。用 BS210S 电子天平 (德国 Sartorius, 精确到 0.001 g) 称量各器官去内容物重 (without content), 即鲜重 (empty, E)。总消化道 (total alimentary, TO) 的重量为胃和小肠的相加值。

1.7 消化酶活性的测定

在取材时, 将称重后的小肠分为空肠、回肠、十二指肠, 剪取一部分空肠置于 EP 管中, 经液氮速冻后保存在 -80 °C 的冰箱内用于消化酶活力测定。实验时取出空肠组织放置于冰上, 准确称取组织质量后加入 20 倍体积的 4 °C 预冷 0.9% 生理盐水。充分研磨成匀浆后 4 °C、8 000 r/min 离心 10 min, 取上清液即为粗酶液, 4 °C 保存, 24 h 内分析完毕。应用酶联免疫吸附实验 (enzyme linked immunosorbent assay, ELISA) 法测定空肠的纤维素酶、氨基肽酶、

淀粉酶以及脂肪酶活性。试剂盒购自北京欣科中晶生物科技有限公司, 按照操作说明进行。

1.8 统计分析

用 SPSS 22.0 软件包进行数据分析。为了消除体重的影响, 基础代谢率和器官的重量采用协方差分析 (ANCOVA) (以体重作为协变量), 由于体脂率是比值, 所以进行反正弦转换后, 体脂率、组织或器官的线粒体状态 4 呼吸 (S4R) 和细胞色素 C 氧化酶 (COX) 活性、单位质量小肠消化酶活性及小肠全重消化酶活性采用独立样本 *t* 检验分析。文中数据以平均值 ± 标准误 (Mean ± SE) 表示, *P* < 0.05 即认为差异显著。

2 结果

2.1 体重和基础代谢率 (BMR)、体脂率

实验前低营养组和高营养组日本鹌鹑的体重无显著差异 (图 1a, $t_{14} = 0.063$, $P > 0.05$)。两种营养饮食分别饲喂 14 d 后, 高营养组的体重极显著高于低营养组 (图 1a, $t_{14} = 4.192$, $P < 0.01$)。实验前、后低营养组和高营养组的基础代谢率均无显著性差异 (图 1b, 实验前 $t_{14} = 2.144$, $P > 0.05$; 实验后 $t_{14} = 1.963$, $P > 0.05$), 经协方差矫正后, 两组的基础代谢率仍无显著差异 ($F_{1,14} = 1.928$, $P > 0.05$)。

实验后, 高营养组的体脂率显著高于低营养组 (图 1c, $t_{14} = 3.155$, $P < 0.01$), 前者的体脂率较后者增加了 24%。

2.2 肝、肌肉、心和肾重量

两种营养饮食饲喂 14 d 后, 高营养组的肾重量显著高于低营养组 ($t_{18} = 2.338$, $P < 0.05$); 肝重量 ($t_{18} = 1.204$, $P > 0.05$)、肌肉重量 ($t_{18} = 1.070$, $P > 0.05$) 和心重量 ($t_{18} = 0.560$, $P > 0.05$) 无显著变化 (表 2)。经协方差矫正后, 高营养组肝重量显著低于低营养组 ($F_{1,18} = 4.126$, $P < 0.05$); 肌肉重量、心重量和肾重量均无显著变化 (表 2)。

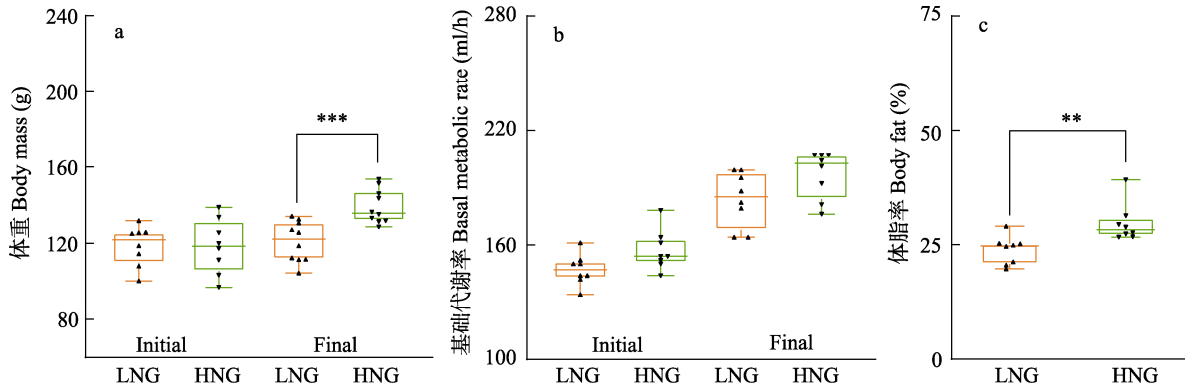


图 1 高、低营养食物取食下日本鹌鹑的体重 (a)、基础代谢率 (b) 和体脂率 (c)

Fig. 1 Body mass (a), basal metabolic rate (b) and body fat percentage (c) of *Coturnix japonica* under high and low nutrient food intake

LNG. 低营养组; HNG. 高营养组. Intial. 实验前; Final. 实验后. ▲/▼ 代表单一数据点. *** $P < 0.001$; ** $P < 0.01$

LNG. Low nutrition group; HNG. High nutrition group. Intial. Before experiment; Final. After experiment. ▲/▼ represents data point. *** $P < 0.001$; ** $P < 0.01$

表 2 高、低营养食物取食下日本鹌鹑 4 种代谢活性器官的重量、线粒体状态 4 呼吸和细胞色素氧化酶活性

Table 2 Organ mass, state 4 respiration, cytochrome C oxidase activity of four metabolically active organs of *Coturnix japonica* under high and low nutrient food intake

器官 Organ	组别 Group	重量 Weight (g)		线粒体状态 4 呼吸 State 4 respiration, S4R (mmol/min)		细胞色素 C 氧化酶活性 Cytochrome C oxidase activity, COX (mmol/min)	
		平均值 ± 标准误 Mean ± SE	结果 Result df = 18	平均值 ± 标准误 Mean ± SE	结果 Result df = 18	平均值 ± 标准误 Mean ± SE	结果 Result df = 18
肝 Liver	LNG	2.64 ± 0.16	$t = 1.204$	15.28 ± 1.14	$t = 0.322$	38.68 ± 3.64	$t = 0.152$
	HNG	2.40 ± 0.12	$P = 0.244$	14.85 ± 1.29	$P = 0.751$	39.40 ± 3.04	$P = 0.881$
肌肉 Muscle	LNG	21.14 ± 0.85	$t = 1.070$	79.27 ± 22.72	$t = 0.102$	287.83 ± 62.19	$t = 0.321$
	HNG	22.27 ± 0.62	$P = 0.299$	82.22 ± 17.75	$P = 0.920$	319.13 ± 74.89	$P = 0.752$
心 Heart	LNG	1.02 ± 0.06	$t = 0.560$	9.52 ± 1.28	$t = 0.962$	33.38 ± 3.28	$t = 1.466$
	HNG	1.06 ± 0.03	$P = 0.583$	7.96 ± 1.00	$P = 0.349$	39.81 ± 2.91	$P = 0.160$
肾 Kidney	LNG	0.92 ± 0.06	$t = 2.338$	6.17 ± 0.97	$t = 0.822$	14.85 ± 1.27	$t = 2.678$
	HNG	1.07 ± 0.03	$P = 0.031$	7.19 ± 0.76	$P = 0.422$	21.65 ± 2.20	$P = 0.015$

LNG. 低营养组; HNG. 高营养组. LNG. Low nutrition group; HNG. High nutrition group.

2.3 肝、肌肉、心、肾线粒体状态 4 呼吸 (S4R) 和细胞色素 C 氧化酶 (COX) 活性

两种营养饮食饲喂 14 d 后, 两组日本鹌鹑肝、肌肉、心和肾的单位质量线粒体状态 4 呼吸 (S4R) 和整体器官的线粒体状态 4 呼吸 (S4R) 均未出现显著差异 (表 2)。与低营养组相比, 高营养组的肾单位质量细胞色素 C 氧

化酶 (COX) 活性呈升高趋势且接近显著差异 ($t_{18} = 1.892$, $P = 0.075$); 整体器官的细胞色素 C 氧化酶 (COX) 活性显著升高 (表 2, $t_{18} = 2.678$, $P < 0.05$)。

2.4 小肠和消化道重量

两种营养饮食饲喂 14 d 对日本鹌鹑的小肠重量和消化道重量有显著影响。高营养组的小

肠重量 (图 2a, $t_{18} = 6.536$, $P < 0.01$) 和消化道重量 (图 2b, $t_{18} = 6.463$, $P < 0.01$) 均显著低于低营养组。经协方差矫正后, 上述两个指标的组间差异显著性仍保持不变。

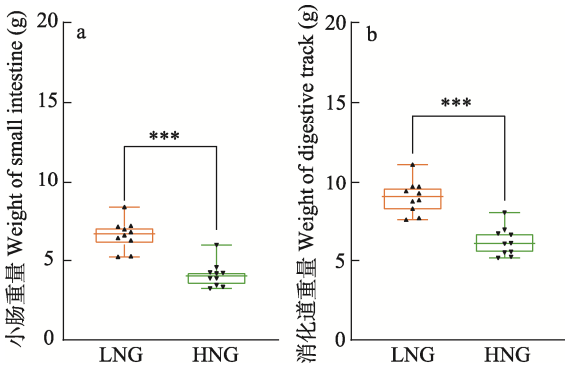


图 2 高、低营养食物取食下日本鹌鹑小肠重量 (a) 和消化道器官重量 (b)

Fig. 2 Weight of small intestine and digestive tract of the *Coturnix japonica* under high and low nutrient food intake

LNG: 低营养组; HNG: 高营养组。▲/▼ 代表单一数据点。*** $P < 0.001$

LNG: Low nutrition group; HNG: High nutrition group. ▲/▼ represents data point. *** $P < 0.001$

2.5 小肠中四种消化酶的活性

两种营养饮食饲喂 14 d 对日本鹌鹑小肠消化酶活性存在不同的影响。单位质量酶活, 高营养组的纤维素酶活性与低营养组相比无显著变化 (图 3a, $t_{13} = 0.806$, $P > 0.05$), 氨基肽酶活性 (图 3b, $t_{18} = 4.283$, $P < 0.01$) 和脂肪酶活性 (图 3d, $t_{18} = 9.641$, $P < 0.01$) 显著高于低营养组, 而淀粉酶活性显著低于低营养组 (图 3c, $t_{18} = 12.781$, $P < 0.01$)。整体器官酶活, 高营养组纤维素酶活性 (图 3a, $t_{13} = 5.328$, $P < 0.01$)、氨基肽酶活性 (图 3b, $t_{18} = 2.876$, $P < 0.01$) 和淀粉酶活性 (图 3c, $t_{18} = 12.049$, $P < 0.01$) 均显著低于低营养组, 脂肪酶活性两组无显著差异 (图 3d, $t_{18} = 1.701$, $P > 0.05$), 但呈降低趋势。

3 讨论

在自然界中, 鸟类经常面临食物资源波动等自然状况的挑战 (Dall et al. 1998)。体重的变化反映了动物的营养水平和应对外界变化时的自我调节能力 (Cherel et al. 1988)。与低营养组饲料相比, 高营养组饲料中较高水平的蛋白质和脂肪组分使得单位质量饲料的能值升高, 这可能是高营养组日本鹌鹑体重显著升高的重要原因。基础代谢率通常被认为是比较个体间能量代谢水平的重要指标 (McKechnie et al. 2007)。当环境中食物资源丰富度改变或食物的质量改变时, 许多鸟类会通过改变基础代谢率来维持机体的能量平衡 (Cherel et al. 1988)。

在种间水平上, McNab (2009) 发现, 以花蜜/花粉或坚果为食的鸟类比杂食鸟类具有更高的基础代谢率, 杂食鸟类的基础代谢率高于仅吃水生无脊椎动物、昆虫或种子的鸟类。在种内水平上, Sabat 等 (2009) 发现红领带鹑 (*Zonotrichia capensis*) 在高营养饮食下比低营养饮食具备更低的基础代谢率。同样, 红腹滨鹑从高营养食物转为低营养食物, 其基础代谢率降低 (Piersma et al. 1996)。但是调整食物中的纤维素含量并未改变紫翅椋鸟 (Geluso et al. 1999) 的基础代谢率。本研究中, 日本鹌鹑在高、低营养饮食下实验 14 d 基础代谢率变化也不显著。将同样为恒温动物的小型哺乳动物与鸟类进行对比发现, 对于小型哺乳动物而言, 食物营养成分对其基础代谢率的影响也不尽相同。如: 长爪沙鼠 (Zhao et al. 2009) 和智利八齿鼠 (*Octodon degus*) (Veloso et al. 1993) 在低营养饮食下基础代谢率显著降低。此外, 高脂饮食下黑线仓鼠 (*Cricetulus barabensis*) 的基础代谢相较于对照组显著提高 (Shi et al. 2017)。然而, 高糖饮食并未改变大绒鼠 (*Eothenomys miletus*) 的静息代谢率 (龚雪娜等 2021)。纤维素含量变化对布氏田鼠 (*Lasiopodomys brandtii*) 的基础代谢率也无明显影响 (Song et al. 2006)。结合已有文献报道和本实验的研究结果可知, 食物的营养组成改变对小型恒温

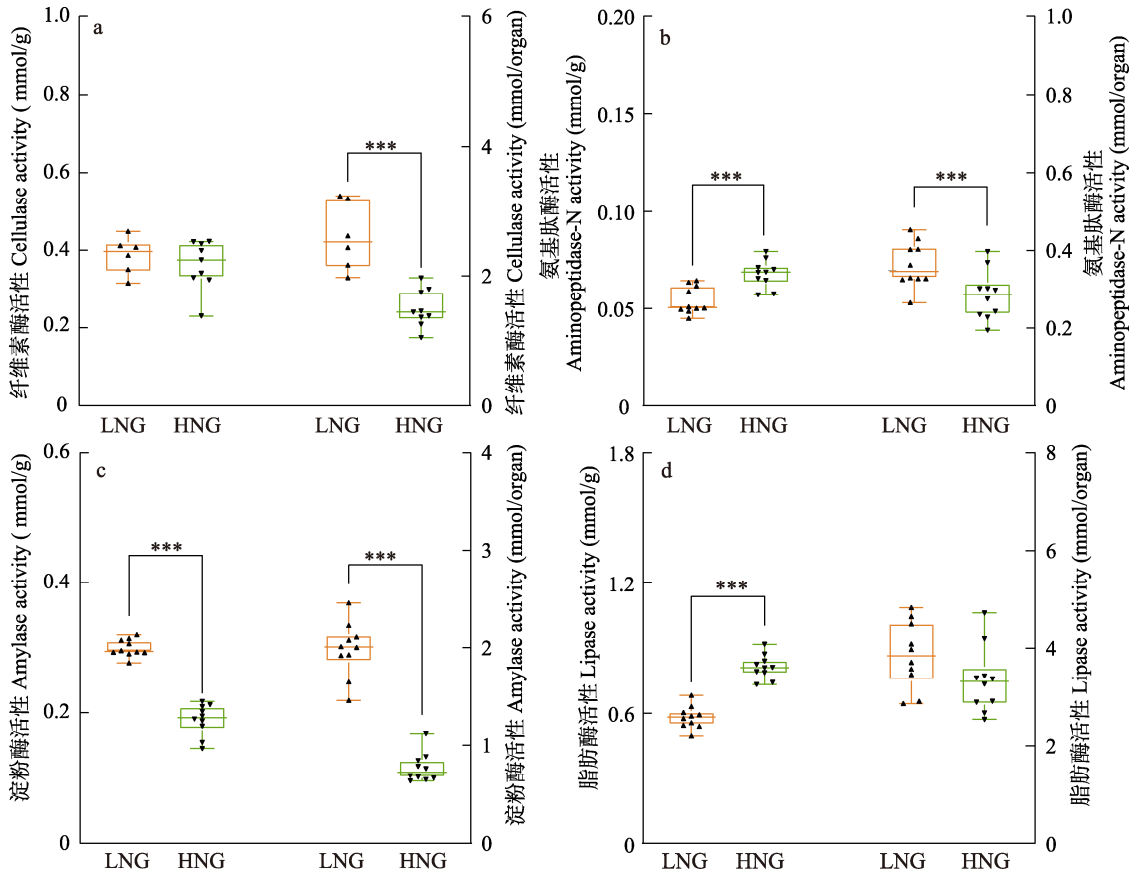


图3 高、低营养食物取食下日本鹌鹑小肠纤维素酶活性 (a)、氨基肽酶活性 (b)、淀粉酶活性 (c) 及脂肪酶活性 (d)

Fig. 3 Intestinal cellulase activity (a), aminopeptidase activity (b), amylase activity (c) and lipase activity (d) in *Coturnix japonica* under high and low nutrient food intake

每个图中, 左侧一组数据是单位质量酶活性, 右侧一组数据是小肠中的整体酶活性。LNG: 低营养组; HNG: 高营养组。▲/▼ 代表单一数据点。*** $P < 0.001$

In each graph, the data set on the left is the enzyme activity per unit mass, and the data on the right is the overall enzyme activity in the small intestine. LNG: Low nutrition group; HNG: High nutrition group. ▲/▼ represents data point. *** $P < 0.001$

动物基础代谢率的影响不尽相同, 食物营养组分不是影响基础代谢率的唯一影响因素。

食物脂肪含量是体脂变化的主要因素, Rozman 等 (2003) 发现, 当食物丰富度不足时, 鸟类会改变体内脂肪含量来应对食物短缺。徐兴军等 (2018) 发现, 以脂肪和蛋白质含量高的黄粉虫 (*Tenebrio molitor*) 为食的树麻雀体脂含量高于以纤维素含量较高的稗草 (*Echinochloa crusgalli*) / 标准饮食小米

(*Setaria italica*) 为食的树麻雀。在小型哺乳动物中, 冬季以油脂含量较高的大豆为食的黑线仓鼠的体脂显著高于夏季以植物茎叶为食的黑线仓鼠 (毕中强等 2018)。这说明食物营养丰富会促进小型恒温动物体脂积累。本研究发现, 高营养组日本鹌鹑也采取了类似的策略, 这可能是本研究与低营养组相比, 高营养组日本鹌鹑体脂含量显著升高的重要原因, 这导致脂肪蓄积, 体脂率显著升高。

鸟类在受到食物热量和种类等方面的影响时,除了调节整体水平的表型可塑性,也会改变自身的内脏器官表型(张志强等 2009)。肾是重要的排泄器官,可以排出体内多余的水、代谢废物和有害物质。研究发现,日本鹌鹑在高营养饮食下,肾的细胞色素 C 氧化酶(COX)活性显著高于低脂肪组。高营养组食物中具有较高脂肪含量,与蛋白质和糖类的代谢相比,脂质代谢具有较低的食物热效应(Teyssier et al. 2022),因此机体获得相同的热量需要代谢更多的脂质从而产生更多的水。这可能是高营养组肾细胞色素 C 氧化酶(COX)活性显著增加的原因之一。食用高蛋白食物的动物处理含氮废物的能力较好,陆生鸟类通过肾来实现该功能。因此膳食成分可能是一种调节鸟类肾形态和功能的重要影响因素(Barceló et al. 2012)。前人研究表明,适应高蛋白饮食通常会导致肾质量和肾髓质厚度增加,这与机体产生的含氮废物量增加有关,如 Goldstein 等(2001)发现,家麻雀面临高蛋白饮食时,在不改变肾质量的前提下通过增加肾髓质占比来适应高蛋白食物;此外, Sabat 等(2004)研究发现,高蛋白组(含 30%酪蛋白)红领带鹑的肾质量相较于低蛋白组(含 7%酪蛋白)肾质量显著增加。本研究发现,高营养组的日本鹌鹑肾重量显著增加,可能与营养成分中较高的蛋白质含量有关。

综上,与低营养组相比,高营养组日本鹌鹑的基础代谢率虽然没有出现显著性的差异,但有升高的趋势;与此相对应,高营养组显著增加了日本鹌鹑的体重、体脂率、肾等代谢器官的质量和呼吸酶活性等代谢产热相关指标。这些结果表明,食物营养成分的变化会影响动物的代谢产热,且这种影响可能广泛存在于整体、器官和细胞等多个水平。

消化道是机体从外界获取营养物质并消化的重要部位,食物营养可以通过影响摄食量改变肠道重量。有研究发现,在面对不同的食物时鸟类的消化道形态表现出较强的可塑性变化,例如白喉带鹑(*Z. albicollis*)(McWilliams

et al. 2001)、莺鹌鹑(*Troglodytes aedon*)(Dykstra et al. 1992)和日本鹌鹑(Starck et al. 2003)等鸟类均可以通过调节消化器官的长度和重量改变肠道容量,从而显著改变肠道的消化和吸收能力。在对日本鹌鹑的相关研究中发现,其肠道形态调整可能是由能量稀释效应驱动的,摄食量通常随着食物能量的稀释增加,因此摄入能量密度较低的食物会使动物的摄食量增加,并最终导致肠道体积或质量增大(Kehoe et al. 1988, Starck et al. 1995, Williamson et al. 2014)。相反,当摄食量减少时,所需容纳食物的肠道空间也相应变小。例如, Savory 等(1976)发现,日本鹌鹑从低营养饮食换成高营养饮食后食物摄入量减小,在 3 至 4 周其肠道体积缩小至稳定水平。本研究发现,与低营养组相比,高营养组的日本鹌鹑小肠重量和消化道重量均显著降低,这可能是由于高营养食物热量较高,日本鹌鹑仅需采食极少的食物即可满足自身能量需求。总之,本研究结果表明,短期营养饮食改变足以引起日本鹌鹑消化道形态发生适应性调整,与 Williamson 等(2014)以及 Savory 等(1976)的研究结论均相符合。然而, Jørgensen 等(2008)的研究则发现,经过历时 20 d 的饲喂,肉鸡消化道重量随食物中菜籽油含量的增加呈上升趋势,这可能因为长期高脂饮食下,肠道自身积累脂肪的结果。我们推测消化道的调整可能受到驯化时间长短的影响。

此外,消化器官能分泌不同类型的消化酶(包括淀粉酶、蛋白酶、脂肪酶、纤维素酶等),促进食物的消化和分解。Platel 等(2000)认为,食物是动物消化酶活性最直接的影响因子。按照适应性调节假说,鸟类会通过改变体内消化酶的活性或消化酶的分泌量来应对食物的变化。研究发现,树麻雀在冬季及早春以杂草种子和野生禾本科植物的种子为食,其消化道中淀粉酶活性与蛋白酶活性均处在较高水平(徐兴军等 2012)。对松莺(*Dendroica pinus*)的研究也发现,消化酶的活性高低与饮食中各底物成分的含量成正比,其脂肪酶活性随着食物

中脂质含量的增加而增加 (Levey et al. 1999)。本研究发现, 与低营养饮食相比, 高营养饮食条件下日本鹌鹑的单位质量小肠脂肪酶活性显著升高, 与其所食用的饲料成分中脂质成分的高比例相符合。Caviedes-Vidal 等 (2000) 发现, 食用高脂日粮的禽类肠道中的糖酶和肽酶活性降低。Kohl 等 (2017) 关于高蛋白日粮对绿头鸭 (*Anas platyrhynchos*)、原鸡 (*Gallus gallu*) 和日本鹌鹑等鸟类消化酶影响的研究则发现, 仅有绿头鸭的氨基肽酶活性显著增加。与该研究的结果不同, 本研究发现高营养条件下的日本鹌鹑消化道单位质量组织中氨基肽酶活性显著增加, 与适应性调节假说相吻合。上述实验结果的差异可能与食物的性质和驯化时间等方面的差异有关 (Yang et al. 2013)。此外, 与低营养饮食相比, 高营养饮食条件下日本鹌鹑的单位质量小肠淀粉酶活性显著降低、纤维素酶活性无显著性变化, 这些结果与其所食用的饲料成分中相应成分的比例以及适应性调节假说均相符合。上述两种营养条件下消化酶在小肠整体器官水平上的差异与小肠整体器官重量的变化有关。鸟类消化酶的适应灵活性有利于促进鸟类饮食多样性的进化 (Chen et al. 2019)。

取食高、低两种营养食物时, 雄性日本鹌鹑的消化系统发生了适应性调节。可能是由于高营养食物中能量较高, 只需消化较少的食物即可满足能量及营养需求, 因此高营养组日本鹌鹑消化道重量和消化酶活性都呈下调趋势。说明鸟类的身体结构与其生理功能相适应且符合“足够但不过多”的原则, 以保证净能量营养收益最大化 (Diamond 1991)。

总之, 本研究表明当食物质量改变时, 鸟类可以通过调整自身代谢产热和消化道功能等方式发生可塑性适应反应, 这些调整贯穿整体、器官、细胞和消化酶活性等多个水平。未来更多的研究应该关注鸟类面对不同食物的适应策略, 这将有利于研究鸟类的进化特征。

致谢 感谢温州大学动物生理生态学研究组全体成员的帮助。

参 考 文 献

- AL-Mansour M I. 2004. Seasonal variation in basal metabolic rate and body composition within individual sanderling bird *Calidris alba*. *Journal of Biological Sciences*, 4(4): 564–567.
- Barceló G, Salinas J, Sabat P. 2012. Body mass, phylogeny and diet composition affects kidney morphology in passerine birds. *Journal of Morphology*, 273(8): 842–849.
- Bech C, Rønning B, Moe B. 2004. Individual variation in the basal metabolism of Zebra finches *Taeniopygia guttata*: no effect of food quality during early development. *International Congress Series*, 1275: 306–312.
- Brand M D, Bishop T, Boutilier R G, et al. 2000. Mitochondrial proton conductance, standard metabolic rate and metabolic depression // Gerhard H, Klingenspor M. *Life in the Cold*. Springer Berlin Heidelberg, 413–430.
- Brzek P, Kohl K D, Caviedes-Vidal E, et al. 2011. Fully reversible phenotypic plasticity of digestive physiology in young house sparrows: lack of long-term effect of early diet composition. *Journal of Experimental Biology*, 214(16): 2755–2760.
- Caviedes-Vidal E, Afik D, del Rio C M, et al. 2000. Dietary modulation of intestinal enzymes of the house sparrow (*Passer domesticus*): testing an adaptive hypothesis. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 125(1): 11–24.
- Chen Y H, Zhao H B. 2019. Evolution of digestive enzymes and dietary diversification in birds. *PeerJ*, 7: e6840.
- Cherel Y, Robin J P, Le Maho Y. 1988. Physiology and biochemistry of long-term fasting in birds. *Canadian Journal of Zoology*, 66(1): 159–166.
- Dall S R X, Witter M S. 1998. Feeding interruptions, diurnal mass changes and daily routines of behaviour in the zebra finch. *Animal Behaviour*, 55(3): 715–725.
- Derting T L, Bogue B A. 1993. Responses of the gut to moderate energy demands in a small herbivore (*Microtus pennsylvanicus*). *Journal of Mammalogy*, 74(1): 59–68.
- Diamond J. 1991. Evolutionary design of intestinal nutrient absorption: enough but not too much. *Physiology*, 6(2): 92–96.
- Diamond J, Hammond K. 1992. The matches, achieved by natural selection, between biological capacities and their natural loads.

- Experientia, 48(6): 551–557.
- Dykstra C R, Karasov W H. 1992. Changes in gut structure and function of house wrens (*Troglodytes aedon*) in response to increased energy demands. *Physiological Zoology*, 65(2): 422–442.
- Estabrook R W. 1967. Mitochondrial respiratory control and the polarographic measurement of ADP: O ratios. *Methods in Enzymology*, 10(3): 41–47.
- Firth N L, Ross D A, Thonney M L. 1985. Comparison of ether and chloroform for Soxhlet extraction of freeze-dried animal tissues. *Journal of the Association of Official Analytical Chemists*, 68(6): 1228–1231.
- Gao W R, Zhu W L, Wang Z K. 2016. The role of dietary fiber content on energy metabolism, thermogenesis, and leptin in Chevrier's field mouse (*Apodemus chevrieri*). *Canadian Journal of Zoology*, 94(6): 395–404.
- Geluso K, Hayes J P. 1999. Effects of dietary quality on basal metabolic rate and internal morphology of European starlings (*Sturnus vulgaris*). *Physiological and Biochemical Zoology*, 72(2): 189–197.
- Goldstein D L, Guntle L, Flaugh C. 2001. Renal response to dietary protein in the house sparrow *Passer domesticus*. *Physiological and Biochemical Zoology*, 74(3): 461–467.
- Jørgensen H, Zhao X Q, Theil P K, et al. 2008. Effect of graded levels of rapeseed oil in isonitrogenous diets on the development of the gastrointestinal tract, and utilisation of protein, fat and energy in broiler chickens. *Archives of Animal Nutrition*, 62(4): 331–342.
- Karasov W H. 1996. Digestive plasticity in avian energetics and feeding ecology // Carey C. *Avian Energetics and Nutritional Ecology*. Boston, MA: Springer US: 61–84.
- Kehoe F P, Ankney C D, Alisauskas R T. 1988. Effects of dietary fiber and diet diversity on digestive organs of captive Mallards (*Anas platyrhynchos*). *Canadian Journal of Zoology*, 66(7): 1597–1602.
- Kohl K D, Ciminari M E, Chediack J G, et al. 2017. Modulation of digestive enzyme activities in the avian digestive tract in relation to diet composition and quality. *Journal of Comparative Physiology B*, 187(2): 339–351.
- Levey D J, Place A R, Rey P J, et al. 1999. An experimental test of dietary enzyme modulation in pine warblers *Dendroica pinus*. *Physiological and Biochemical Zoology*, 72(5): 576–587.
- Li C X, Liu C Y, Hu P X, et al. 2022. Seasonal adjustments in body mass and basal thermogenesis in Chinese hwameis (*Garrulax canorus*): the roles of temperature and photoperiod. *Journal of Experimental Biology*, 225(17): jeb244502.
- McKechnie A E, Chetty K, Lovegrove B G. 2007. Phenotypic flexibility in the basal metabolic rate of laughing doves: responses to short-term thermal acclimation. *Journal of Experimental Biology*, 210(1): 97–106.
- McKechnie A E, Wolf B O. 2004. The allometry of avian basal metabolic rate: good predictions need good data. *Physiological and Biochemical Zoology*, 77(3): 502–521.
- McNab B K. 1986. The influence of food habits on the energetics of eutherian mammals. *Ecological Monographs*, 56(1): 1–19.
- McNab B K. 2009. Ecological factors affect the level and scaling of avian BMR. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 152(1): 22–45.
- McWilliams S R, Karasov W H. 2001. Phenotypic flexibility in digestive system structure and function in migratory birds and its ecological significance. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A, Molecular & Integrative Physiology*, 128(3): 579–593.
- Minvielle F. 2004. The future of Japanese quail for research and production. *World's Poultry Science Journal*, 60(4): 500–507.
- Pei Y, Wang D, Hume I D. 2001. Effects of dietary fibre on digesta passage, nutrient digestibility, and gastrointestinal tract morphology in the granivorous Mongolian gerbil (*Meriones unguiculatus*). *Physiological and Biochemical Zoology*, 74(5): 742–749.
- Piersma T, Bruinzeel L, Drent R, et al. 1996. Variability in basal metabolic rate of a long-distance migrant shorebird (red knot, *Calidris canutus*) reflects shifts in organ sizes. *Physiological Zoology*, 69(1): 191–217.
- Piersma T, Drent J. 2003. Phenotypic flexibility and the evolution of organismal design. *Trends in Ecology & Evolution*, 18(5): 228–233.
- Piersma T, Lindström A. 1997. Rapid reversible changes in organ size as a component of adaptive behaviour. *Trends in Ecology &*

- Evolution, 12(4): 134–138.
- Platel K, Srinivasan K. 2000. Influence of dietary spices and their active principles on pancreatic digestive enzymes in albino rats. *Die Nahrung*, 44(1): 42–46.
- Rott K H, Caviedes-Vidal E, Karasov W H. 2017. Intestinal digestive enzyme modulation in house sparrow nestlings occurs within 24 h of a change in diet composition. *Journal of Experimental Biology*, 220(Pt 15): 2733–2742.
- Rozman J, Runciman D, Zann R A. 2003. Seasonal variation in body mass and fat of Zebra Finches in south-eastern Australia. *Emu - Austral Ornithology*, 103(1): 11–19.
- Sabat P, Cavieres G, Veloso C, et al. 2009. Intraspecific basal metabolic rate varies with trophic level in rufous-collared sparrows. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 154(4): 502–507.
- Sabat P, Sepúlveda-Kattan E, Maldonado K. 2004. Physiological and biochemical responses to dietary protein in the omnivore passerine *Zonotrichia capensis* (Emberizidae). *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 137(2): 391–396.
- Savory C J, Gentle M J. 1976. Effects of dietary dilution with fibre on the food intake and gut dimensions of Japanese quail. *British Poultry Science*, 17(6): 561–570.
- Shang Q H, Wu D, Liu H S, et al. 2020. The impact of wheat bran on the morphology and physiology of the gastrointestinal tract in broiler chickens. *Animals*, 10(10): 1831.
- Shi L L, Fan W J, Zhang J Y, et al. 2017. The roles of metabolic thermogenesis in body fat regulation in striped hamsters fed high-fat diet at different temperatures. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 212: 35–44.
- Song Z G, Wang D H. 2006. Basal metabolic rate and organ size in Brandt's voles (*Lasiopodomys brandtii*): effects of photoperiod, temperature and diet quality. *Physiology & Behavior*, 89(5): 704–710.
- Starck J M, Kloss E. 1995. Structural responses of Japanese quail intestine to different diets. *DTW Deutsche Tierärztliche Wochenschrift*, 102(4): 146–150.
- Starck J M, Rahmaan G H. 2003. Phenotypic flexibility of structure and function of the digestive system of Japanese quail. *Journal of Experimental Biology*, 206(11): 1887–1897.
- Sundin U, Moore G, Nedergaard J, et al. 1987. Thermogenin amount and activity in hamster brown fat mitochondria: effect of cold acclimation. *American Journal of Physiology*, 252(5 Pt 2): R822–R832.
- Swanson D L, Garland T Jr. 2009. The evolution of high summit metabolism and cold tolerance in birds and its impact on present-day distributions. *Evolution*, 63(1): 184–194.
- Teysier J R, Brugaletta G, Sirri F, et al. 2022. A review of heat stress in chickens. part II: insights into protein and energy utilization and feeding. *Frontiers in Physiology*, 13: 943612.
- Veloso C, Bozinovic F. 1993. Dietary and digestive constraints on basal energy metabolism in a small herbivorous rodent. *Ecology*, 74(7): 2003–2010.
- Williams J B, Tieleman B I. 2000. Flexibility in basal metabolic rate and evaporative water loss among hoopoe larks exposed to different environmental temperatures. *Journal of Experimental Biology*, 203(Pt 20): 3153–3159.
- Williamson S A, Jones S K, Munn A J. 2014. Is gastrointestinal plasticity in king quail (*Coturnix chinensis*) elicited by diet-fibre or diet-energy dilution? *Journal of Experimental Biology*, 217(Pt 11): 1839–1842.
- Wu M X, Zhou L M, Zhao L D, et al. 2015. Seasonal variation in body mass, body temperature and thermogenesis in the Hwamei, *Garrulax canorus*. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 179: 113–119.
- Yang H, Zhou X, Wang Z, et al. 2013. Effects of different diets on growth performance, physiological parameters of digestive tract and apparent digestibility in geese. *African Journal of Biotechnology*, 12: 1288–1296.
- Zhao Z J, Wang D H. 2009. Plasticity in the physiological energetics of Mongolian gerbils is associated with diet quality. *Physiological and Biochemical Zoology*, 82(5): 504–515.
- Zheng W H, Li M, Liu J S, et al. 2014b. Seasonal variation of metabolic thermogenesis in Eurasian tree sparrows (*Passer montanus*) over a latitudinal gradient. *Physiological and Biochemical Zoology*, 87(5): 704–718.
- Zheng W H, Liu J S, Swanson D L. 2014a. Seasonal phenotypic

- flexibility of body mass, organ masses, and tissue oxidative capacity and their relationship to resting metabolic rate in Chinese bulbuls. *Physiological and Biochemical Zoology*, 87(3): 432–444.
- Zhou L M, Xia S, Chen Q, et al. 2016. Phenotypic flexibility of thermogenesis in the hwamei (*Garrulax canorus*): responses to cold acclimation. *American Journal of Physiology Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 310(4): R330–R336.
- Zhu W L, Zhang L, Gao W R, et al. 2014. Effects of temperature and diet on energy budget and hormone concentrations in south China field mouse, *Apodemus draco*, from Hengduan Mountain region. *Pakistan Journal of Zoology*, 46(2): 485–496.
- 毕中强, 闻靖, 施璐璐, 等. 2018. 温度和高脂食物对黑线仓鼠代谢产热和体脂累积的影响. *兽类学报*, 38(4): 384–392.
- 龚雪娜, 贾婷, 张浩, 等. 2021. 横断山不同海拔地区大绒鼠面对高糖食物变化的生理和行为响应. *动物学杂志*, 56(4): 569–581.
- 柳劲松, 李铭, 邵淑丽. 2008. 树麻雀肝脏和肌肉产热特征的季节性变化. *动物学报*, 54(5): 777–784.
- 柳劲松, 宋春光, 王晓恒, 等. 2004. 燕雀和麻雀代谢产热及消化道形态特征比较. *动物学杂志*, 39(3): 2–7.
- 王德华, 杨明, 刘全生. 2009. 小型哺乳动物生理生态学研究 with 进化思想. *兽类学报*, 29(4): 343–351.
- 王家妮, 程如越, 罗雅亭, 等. 2021. 高脂饲料诱导小鼠代谢综合征及对肠道发育、肝脏功能和肠道菌群的影响. *卫生研究*, 50(1): 93–99.
- 王丽莎, 庞有志. 2013. 鹌鹑的实验动物学价值. *生物学通报*, 48(5): 8–11.
- 徐兴军, 邵淑丽, 张伟伟, 等. 2012. 春季树麻雀体内几种消化酶活性研究. *四川动物*, 31(5): 782–785.
- 徐兴军, 田金波, 王有祥, 等. 2018. 食物组分差异对树麻雀能量代谢及消化道形态结构的影响. *浙江农林大学学报*, 35(2): 347–354.
- 张志强, 王德华. 2009. 长爪沙鼠脏器重量和肠道长度的季节性变化. *兽类学报*, 29(3): 294–301.

西藏拉萨发现西伯利亚银鸥和普通海鸥

Vega Gull *Larus vegae* and Mew Gull *L. canus* Found in Lhasa, Xizang, China

2020年12月25日, 在拉萨市拉鲁湿地国家级自然保护区内发现1只成年银鸥, 该个体站立于略结冰的一片草本沼泽中(91°06'26" E, 29°40'36" N, 海拔3 653 m), 与邻近的渔鸥(*Ichthyaetus ichthyaetus*)体型相近, 其喙黄色并具红点, 头及颈部几乎全白, 无褐色纵纹, 上体体羽由灰至深灰色, 下体雪白, 跗跖浅粉色(图1左)。查阅相关文献(赵欣如 2018), 鉴定为西伯利亚银鸥(*Larus vegae*)。西伯利亚银鸥两个亚种在外形上略有区别, *vegae*亚种冬季头颈部密布灰褐色细纹, 上体灰色略深, 脚粉色, *mongolicus*亚种头部及颈部全年几乎全白, 冬季后颈有不明纵纹(刘阳等 2021, 约翰·马敬能等 2022), 据此鉴定本次发现个体为*mongolicus*亚种。

(下转第92页)

基金项目 第二次青藏高原综合科学考察研究项目(No. 2019QZKK0304), 西藏自治区重点研发计划项目(No. XZ202201ZY0005G), 中央引导地方科技发展资金项目(No. XZ202201YD0015C);

* 通讯作者, E-mail: yangletibet@126.com;

第一作者简介 杨永炳, 男, 研究实习员; 研究方向: 青藏高原鸟类生态学; E-mail: 1208732994@qq.com.

收稿日期: 2021-03-23, 修回日期: 2023-12-01 DOI: 10.13859/j.cjz.202421062 CSTR: 32109.14.cjz.21062