

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第31卷 第6期 Vol.31 No.6 **2011**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 31 卷 第 6 期 2011 年 3 月 (半月刊)

目 次

臭氧胁迫对水稻生长以及 C、N、S 元素分配的影响	郑飞翔,王效科,侯培强,等 (1479)
高含氮稻田深层土壤的氨氧化古菌和厌氧氨氧化菌共存及对氮循环的影响	王 雨,祝贵兵,王朝旭,等 (1487)
气候年际变率对全球植被平均分布的影响	邵 璞,曾晓东 (1494)
模拟升温 and 放牧对高寒草甸土壤有机碳氮组分和微生物生物量的影响	王 蓓,孙 庚,罗 鹏,等 (1506)
广州城区生态安全岛典型植物群落结构及物种多样性	莫 丹,管东生,黄康有,等 (1515)
中亚热带湿地松人工林生长过程	马泽清,刘琪璟,王辉民,等 (1525)
潜流人工湿地中植物对氮磷净化的影响	刘树元,阎百兴,王莉霞 (1538)
模拟氮沉降对两种竹林不同凋落物组分分解过程养分释放的影响	涂利华,胡庭兴,张 健,等 (1547)
苔藓植物对贵州丹寨汞矿区汞污染的生态监测	刘荣相,王智慧,张朝晖 (1558)
三峡库区泥、沙沉降对低位狗牙根种群的影响	李 强,丁武泉,朱启红,等 (1567)
上海崇明东滩互花米草种子产量及其萌发对温度的响应	祝振昌,张利权,肖德荣 (1574)
栲-木荷林凋落叶混合分解对土壤有机碳的影响	张晓鹏,潘开文,王进闯,等 (1582)
荒漠化对毛乌素沙地土壤呼吸及生态系统碳固持的影响	丁金枝,来利明,赵学春,等 (1594)
黄土丘陵沟壑区小流域土壤有机碳空间分布及其影响因素	孙文义,郭胜利 (1604)
种间互作和施氮对蚕豆/玉米间作生态系统地上部和地下部生长的影响	李玉英,胡汉升,程 序,等 (1617)
测墒补灌对冬小麦氮素积累与转运及籽粒产量的影响	韩占江,于振文,王 东,等 (1631)
植被生化组分光谱模型抗土壤背景的能力	孙 林,程丽娟 (1641)
北方两省农牧交错带沙棘根围 AM 真菌与球囊霉素空间分布	贺学礼,陈 程,何 博 (1653)
基于水源涵养的流域适宜森林覆盖率研究——以平通河流域(平武段)为例	朱志芳,龚固堂,陈俊华,等 (1662)
黑龙江大兴安岭呼中林区火烧点格局分析及影响因素	刘志华,杨 健,贺红士,等 (1669)
大兴安岭小尺度草甸火燃烧效率	王明玉,舒立福,宋光辉,等 (1678)
长江口中华鲟自然保护区底层鱼类的群落结构特征	张 涛,庄 平,章龙珍,等 (1687)
骨顶鸡等游禽对不同的人为干扰的行为响应	张微微,马建章,李金波 (1695)
光周期对白头鹇体重、器官重量和能量代谢的影响	倪小英,林 琳,周菲菲,等 (1703)
应用稳定同位素技术分析华北部分地区第三代棉铃虫虫源性质	叶乐夫,付 雪,谢宝瑜,等 (1714)
西花蓟马对蔬菜寄主的选择性	袁成明,郅军锐,曹 宇,等 (1720)
基于 Cyt b 基因序列分析的松毛虫种群遗传结构研究	高宝嘉,张学卫,周国娜,等 (1727)
沼液的定价方法及其应用效果	张昌爱,刘 英,曹 曼,等 (1735)
垃圾堆肥基质对不同草坪植物生态及质量特征的影响	赵树兰,廉 菲,多立安 (1742)
五氯酚在稻田中的降解动态及生物有效性	王诗生,李德鹏 (1749)
专论与综述	
景观遗传学:概念与方法	薛亚东,李 丽,吴巩胜,等 (1756)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 284 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 31 * 2011-03



封面图说:美丽优雅的新疆夏尔西里森林草地原始景观。夏尔西里国家级自然保护区建立在新疆博乐北部山区无人干扰的中哈边境上,图中雪地云杉为当地的优势树种。

彩图提供:国家林业局陈建伟教授 E-mail: cites.chenjw@163.com

光周期对白头鹀体重、器官重量和能量代谢的影响

倪小英¹, 林琳², 周菲菲¹, 王小华¹, 柳劲松^{1,*}

(1. 温州大学生命与环境科学学院, 浙江 温州 325035; 2. 杭州师范大学生命与环境科学学院, 浙江 杭州 310036)

摘要: 光周期是四季环境变化的最直接表现因素之一, 并影响动物的生理变化特征。为探讨光周期驯化对白头鹀 (*Pycnonotus sinensis*) 体重、器官重量及能量代谢的影响, 以室温 28℃、不同光周期 (16L:8D, LD 组和 8L:16D, SD 组) 对两组白头鹀进行为期 4 周的光周期驯化, 测定其体重、各器官鲜重和干重、基础代谢率 (BMR) 和食物摄入能、排泄能及同化能并计算同化率。结果发现, SD 组个体体重、内部器官 (肝、小肠) 重量、BMR 及同化率相应显著高于 LD 组个体; 短光照刺激白头鹀显著降低摄入能、排泄能及同化能。这些结果表明: 光周期对白头鹀的体重、器官重量、BMR 及能量收支有着一定影响, 并且短光照较长光照更能引起白头鹀体重、器官重量及能量代谢的明显变化, 同时验证了“中心限制假说”, 即白头鹀 BMR 与中心器官代谢 (肝、小肠等) 具有相关性, 中心器官是改变白头鹀 BMR 的主要原因之一。

关键词: 白头鹀; 光周期; 体重; 器官重量; 基础代谢率; 能量收支

Effects of photoperiod on body mass, organ masses and energy metabolism in Chinese bulbul (*Pycnonotus sinensis*)

NI Xiaoying¹, LIN Lin², ZHOU Feifei¹, WANG Xiaohua¹, LIU Jinsong^{1,*}

1 School of Life and Environmental Sciences, Wenzhou University, Wenzhou 325035, Zhejiang, China

2 School of Life and Environmental Sciences, Hangzhou Normal University, Hangzhou 310036, Zhejiang, China

Abstract: Photoperiod acts as an environmental zeitgeber for seasonal acclimatization of thermoregulation in some birds. The present study was designed to examine the effects of photoperiod alone on the plasticity of body mass, metabolic organs and metabolism in Chinese bulbul (*Pycnonotus sinensis*). Twenty adult Chinese bulbuls were live-trapped by mist net in Wenzhou Zhejiang Province (27°29'N, 120°51'E) from March to April 2008. After one week adaptation to laboratory conditions, they were randomly assigned into either long (LD; 16L:8D, $n=10$) or short photoperiod (SD; 8L:16D, $n=10$) for 4 weeks at a constant temperature (28°C). Food was provided in excess of the birds' needs and water was supplied *ad lib*. The birds were weighed (to 0.01g, Sartorius balance model BT25S) immediately after live-trapped, and weighed again at a week interval over the period of photoperiodic acclimation. Energy intake was measured in metabolic cages. Food residues and feces were collected on the first day of the experiment and also at a weekly basis, and the caloric contents of them were determined using a oxygen bomb calorimeter (C200, Germany IKA). Metabolic rate (MR) was measured using a closed circuit respirometer. Chamber temperature was controlled within (28±0.5) °C by water bath. Birds were killed and dissected on the day after metabolic measurements, and organ masses were weighed (to 0.1mg, Sartorius balance model BS110S) immediately.

During acclimation, we found the body mass and energy budget of Chinese bulbuls began to have significant differences in two light conditions after the first week. Body mass of SD birds became significantly higher than LD individuals, and all of gross energy intake, excretion energy and digestible energy intake decreased remarkably in SD birds, but energy budget except digestible energy intake kept stable in LD individuals. After the 4 weeks of acclimation, SD birds showed significantly higher body mass, basal metabolic rate (BMR), digestibility, as well as central organ masses (liver and small

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (30670324, 30870377); 浙江省自然科学基金资助项目 (Y506089)

收稿日期: 2010-03-16; **修订日期:** 2011-01-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ljs@wzu.edu.cn

intestine) than LD birds. However, the energy intake, excretion energy and digestible energy intake of SD birds were significantly lower than LD individuals. To summarize, photoperiod had significant effect on body mass, central organ mass (liver and small intestine), BMR and energy budget in Chinese bulbul. The present data were consistent with “the hypothesis of central restriction”, that is some of the metabolic existed in the Chinese bulbul body have positive correlation with the BMR, central organ is one of the function to change the BMR of Chinese bulbul.

Key Words: *Pycnonotus sinensis*; photoperiod; body mass; organ mass; basal metabolic rate; energy budget

动物的适应产热分为专性产热 (obligatory thermogenesis) 和选择性产热 (facultative thermogenesis) 两种^[1-3]。其中专性产热中的基础代谢率 (basal metabolic rate, BMR) 是恒温动物维持正常生理机制的最小产热速率^[4], 受到温度、光照、降水量等环境因子及生长、发育、繁殖等自身生理阶段变化的影响^[5]。目前, BMR 已经成为种间和种内能量代谢水平比较的重要参数, 反映了不同物种的不同个体能量消耗水平^[6]。

动物产热能量调节是动物应对环境变化的一种重要适应。关于动物如何分配能量用于保温、活动、生长、繁殖及进化, 一直都是生态生理学家、进化生理学家等关心的重点^[7]。研究发现体重、系统发育、食性、气候、季节、生活习性等是影响动物 BMR 的主要因素^[5], 其中气候条件是影响 BMR 的最重要因子之一^[8-9]。Klaasen 等人^[10]认为, 对 BMR 季节性变化是否是动物的一种独立适应, 是否是对环境适应的结果, 或是生存生活能力变化的一种表现的认识有着非常重要的意义。而在由季节变化引起的环境其他因子的变化中, 光周期是最为直接表现出昼夜节律和季节变化特征的因素之一^[11], 是预测生物季节生理变化的一个最主要的环境因子^[12]。因光周期的季节性变化, 动物的昼夜节律及季节节律也随之发生相应的变化, 且在生理等方面进行相应的变化适应^[13], 而动物的这种根据环境节律变化而发生生理变化的能力对生物个体来说是一种重要的适应特征^[14]。因此光周期被研究界认为是对生物生活及生存最重要的影响因子之一, 受到广泛的关注。

鸟类是生态系统中一个重要的组成部分, 在自然界的种类和数量众多, 其在维持生态的稳定方面有着关键的作用。小型鸟类因体型较小, 通过增加羽毛等方式维持体温较为有限, 所以产热代谢调节成为其适应外界环境及自身生长阶段能量需求的一项重要策略^[15-16]。而且小型鸟类对外界环境变化较为敏感, 易受环境变化的影响, 目前国内外已见不少有关环境变化对小型鸟类代谢率的影响及小型鸟类对环境变化适应的研究报道^[17-20]。许多研究已表明, 光周期会影响小型动物体重和产热代谢率^[21-26]及能量收支平衡^[27-29]等, 如李庆芬等人^[30]发现短光照能提高布氏田鼠 (*Lasiopodomys brandtii*) 的产热能力; Wang 等人^[28]比较了长短光照对根田鼠 (*Microtus oeconomus*) 摄入能的影响, 发现短光照能刺激其摄入能的增加。而光周期对小型鸟类生理方面影响的研究多见于鸟类生长、发育、免疫系统、繁殖等方面^[31-33], 有关光周期对小型鸟类能量代谢的影响相对较少^[34], 而这方面的研究对进一步了解小型鸟类的环境适应及机理有着重要的意义。

白头鹎 (*Pycnonotus sinensis*) 为留鸟, 属雀形目 (Passeriformes) 鹎科 (Pycnonotidae)。世界分布于欧亚大陆及非洲北部、中南半岛。在我国主要分布于东南沿海地区, 西起四川, 东至沿海一带, 北达陕西南部, 南及广西西南等地。伴随全球气候的变暖, 白头鹎有向北方扩散的趋势, 目前发现白头鹎已扩散至东北等地^[35]。在浙江省白头鹎也是一种最常见的雀形目鸟类之一^[36]。白头鹎食性很杂, 随着季节的变化而不同, 春夏季以动物性食物为主, 秋冬两季则以植物性食物为主。由于白头鹎分布范围广, 数量大, 是具有代表性且一年四季都易获得的良好研究材料, 有利于开展季节性试验^[37]。以往已发现白头鹎具有较高的体温、较低的 BMR 和较宽的热中性区^[7]; 其代谢产热存在明显的季节性变化^[37], 内部器官 (如肝脏、心脏、肾脏和消化道) 及肌肉重量都与 BMR 的大小呈正相关, 认为白头鹎体内存在代谢活性器官, 这些器官组织具有很高的代谢活性, 是白头鹎 BMR 的主要决定因素^[38], 但有关光周期对白头鹎体重、器官重量和能量代谢等方面的影响的相关研究尚未见报道。本研究以白头鹎为研究对象, 探讨白头鹎整体组织水平能量代谢在光周期变化环境中的适应。

1 材料和方法

1.1 实验动物

20 只白头鹀于 2008 年 3 月捕自浙江省温州地区(27°29'N, 120°51'E)。该地区气候温暖, 每季均有降雨, 年平均降雨量可达 1700mm。年平均温度 18℃, 其中有 7 个月(3—9 月)的极端温度超过 37℃。平均最高温度从 7 月的 39℃到 1 月的 8℃, 平均最低温度从 7 月的 28℃到 1 月的 3℃^[37]。标记并单笼(60cm×60cm×30cm)饲养于温州大学动物实验房, 进行自然光照、室温为 28℃的环境条件下自由取食及饮水, 适应 1 周后用于实验。

实验分长光照组(16L:8D)和短光照组(8L:16D)两组, 在自动控光的人工气候室中进行。白头鹀随机分为以上两组驯化 4 周, 每组各 10 只。实验于 2008 年 3 月 10 日至 4 月 7 日之间进行。

1.2 体重的测定

从驯化实验开始, 每隔 7d 测定 1 次动物的体重。体重测定采用电子天平(BT25S, Sartorius)称量, 精确到 0.01g。

1.3 代谢测定

代谢率以每小时单位体重的耗氧量 $[J \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}]$ 及每小时整体耗氧量 $[kJ/h]$ 表示。耗氧量采用封闭式流体压力呼吸测定仪测定^[39], 水浴控制呼吸室温度, 温度控制在 $\pm 0.5^\circ C$ 以内。呼吸室体积为 3.6 L, 用 KOH 和硅胶吸收呼吸室内的 CO_2 和水分。实验温度为 28℃。代谢率(MR)的测定每天在 10:00—20:00 进行。动物实验前禁食 4 h, 放入呼吸室内适应 1 h, 每隔 5 min 记录 1 次, 选择两个连续的, 稳定的最低值计算 MR, 共测定 1 h 的耗氧量。

1.4 能量收支的测定

能量摄入采用代谢笼测定。定时定量给动物喂食并称量动物体重, 以 7d 为 1 个周期。称重及剩余食物、粪便的收集分别在第 1 周的第 1 天和每周的第 7 天进行, 每次收集时间均在 13:00—15:00 进行。收集的食物和粪便, 在 60℃的烘箱中干燥至恒重称重, 并用氧弹热量计(C200, 德国 IKA)的测定热值。能量收支计算根据下列公式^[28, 40]:

摄入能(gross energy intake, GEI)(kJ/d) = 摄入干物质量(g/d)×食物热值(kJ/d)

排泄能(gross excretion energy, GEE)(kJ/d) = 粪便干重(g/d)×粪便热值(kJ/d)

同化能(digestible energy intake, DEI)(kJ/d) = 摄入能(kJ/d) - 排泄能(kJ/d)

同化率(digestibility)(%) = 同化能(kJ/d)/摄入能(kJ/d)×100%

1.5 器官解剖和器官重量的测定

在第 4 周测定 BMR 后, 隔日处死实验鸟, 迅速取出脑、心、肺、肝、肾及整体消化道, 并将消化道各部分小心分离, 剔除肠系膜和脂肪组织, 然后纵剖, 用生理盐水洗净内容物, 滤纸吸干, 采用电子天平(BS110S, Sartorius)称取重量记为鲜重, 精确到 0.1mg。然后将各器官、组织置于 60℃烘箱内烘至恒重, 称量记为干重。

1.6 数据统计

利用 SPSS 统计软件包进行相关统计分析。组间体重比较采用双尾 t 检验分析; 组间器官重量、摄入能、同化能、排泄能、代谢率及同化率均采用协方差分析(ANCOVA); 组内各变量差异比较采用单因素方差(one-way ANOVA)分析。文中数据均以平均值±标准误(Mean±SE)表示, $P < 0.05$ 即认为差异显著。

2 结果

2.1 不同光周期对白头鹀体重和代谢率的影响

2.1.1 体重

实验开始前, SD 组白头鹀体重为(31.6±0.7)g, LD 组为(30.3±0.9)g, 二者没有显著差异($t = 1.113$, $df = 18$, $P = 0.280$)。随着驯化时间的延长, SD 组白头鹀的体重没有明显变化, 而 LD 组略有下降, 但组内差异均不显著($P > 0.05$)(图 1)。从第 7 天开始, SD 组的体重与 LD 组的体重出现明显差异, 第 28 天时 SD 组和 LD

组体重分别为 (32.3 ± 0.8) g 和 (28.9 ± 0.8) g, SD 组的体重比 LD 组的高出 11.8% ($t = 2.934$, $df = 18$, $P = 0.009$), 但与驯化前相比, 各组内无明显差异 ($P > 0.05$) (图 1)。

2.1.2 代谢率

SD 组和 LD 组的白头鹎单位体重 BMR 和整体 BMR 经协方差校正体重后, 均出现明显差异 (单位体重代谢率: $F_{(1,17)} = 8.372$, $P = 0.01$; 整体代谢率: $F_{(1,17)} = 11.696$, $P = 0.003$), SD 组的单位体重代谢率和整体代谢率比 LD 组分别高出 23.8% 和 33.4% (图 2)。

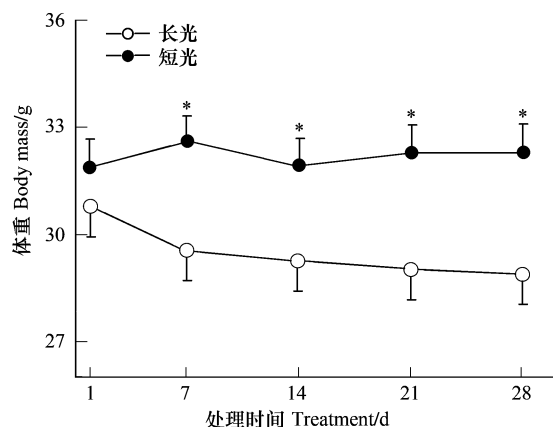


图 1 光周期对白头鹎体重的影响

Fig. 1 Effects of photoperiod on body mass in Chinese bulbul

数据为平均值±标准误, * $P < 0.05$

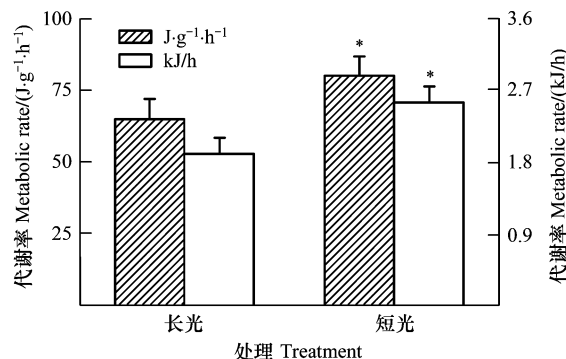


图 2 光周期对白头鹎代谢率的影响

Fig. 2 Effects of photoperiod on metabolic rate in Chinese bulbul

数据为平均值±标准误, * $P < 0.05$

2.2 不同光周期对白头鹎器官重量的影响

当体重校正至 30.58g 时, 数据显示 LD 组与 SD 组白头鹎组间的脑、心、肾、胃、直肠及整体消化道鲜重和干重, 及肺组织干重无显著差异 ($P > 0.05$)。但 LD 组肺鲜重是 SD 组的 116.1%, 两组呈现显著差异 ($F_{(1,17)} = 4.992$, $P = 0.039$); 而 SD 组的肝脏及小肠的鲜重及干重都分别显著高于 LD 组 ($P < 0.05$) (表 1)。

表 1 光照驯化中白头鹎器官重量的调整平均值*

Table 1 Adjustment means of organ mass of Chinese bulbul in photoperiod acclimation*

项目 Item	长光照 Long Day	短光照 Short Day	
样本数 Sample size	10	10	
体重 Body masses/g			
实验前 Initial	30.3 ± 0.9	31.6 ± 0.7	$t = 1.113$, $df = 18$, $P = 0.280$
实验后 Final	28.9 ± 0.8	32.3 ± 0.8	$t = 2.934$, $df = 18$, $P = 0.009$
脑组织鲜重/mg	879.0 ± 12.7	871.2 ± 12.7	$F_{(1,17)} = 0.160$, $P = 0.694$
脑组织干重/mg	201.2 ± 2.6	199.7 ± 2.6	$F_{(1,17)} = 0.128$, $P = 0.725$
心脏鲜重/mg	410.6 ± 16.7	418.9 ± 16.7	$F_{(1,17)} = 0.104$, $P = 0.751$
心脏干重/mg	107.9 ± 4.9	109.4 ± 4.9	$F_{(1,17)} = 0.040$, $P = 0.843$
肺组织鲜重/mg	379.9 ± 15.3	327.2 ± 15.3	$F_{(1,17)} = 4.992$, $P = 0.039$
肺组织干重/mg	61.4 ± 3.0	59.8 ± 2.8	$F_{(1,17)} = 0.146$, $P = 0.707$
肝脏鲜重/mg	1035.0 ± 61.7	1254.2 ± 61.7	$F_{(1,17)} = 5.285$, $P = 0.034$
肝脏干重/mg	364.3 ± 26.8	479.7 ± 26.8	$F_{(1,17)} = 7.795$, $P = 0.013$
肾脏鲜重/mg	321.0 ± 12.0	327.5 ± 12.0	$F_{(1,17)} = 0.121$, $P = 0.732$
肾脏干重/mg	86.2 ± 3.0	90.8 ± 3.0	$F_{(1,17)} = 1.029$, $P = 0.325$
胃鲜重/mg	524.5 ± 43.7	396.7 ± 43.7	$F_{(1,17)} = 3.584$, $P = 0.075$
胃干重/mg	175.9 ± 16.0	124.9 ± 16.0	$F_{(1,17)} = 4.235$, $P = 0.055$

续表

项目 Item	长光照 Long Day	短光照 Short Day	
小肠鲜重/mg	1060.5±131.2	1555.5±131.2	$F_{(1,17)} = 5.973, P=0.026$
小肠干重/mg	238.1±30.7	355.8±30.7	$F_{(1,17)} = 6.148, P=0.024$
直肠鲜重/mg	145.3±54.0	85.4±54.0	$F_{(1,17)} = 0.516, P=0.482$
直肠干重/mg	13.0±1.4	12.7±1.4	$F_{(1,17)} = 0.021, P=0.887$
消化道组织总重量/mg	1730.3±182.3	2037.6±182.3	$F_{(1,17)} = 1.192, P=0.290$
消化道组织干重/mg	427.0±43.3	493.5±43.3	$F_{(1,17)} = 0.988, P=0.334$

* 表中各器官重量的调整平均值系在实测值的基础上通过协方差分析将体重校正至 30.58g 而得到;数值为平均值±标准误

2.3 不同光周期对白头鹀能量收支的影响

2.3.1 摄入能

在实验第 14—28 天里,SD 组的摄入能分别显著低于 LD 组 31.8%、28.9% 和 30.5% (摄入能:第 14 天: $F_{(1,17)} = 7.873, P=0.012$;第 21 天: $F_{(1,17)} = 9.886, P=0.006$;第 28 天: $F_{(1,17)} = 10.815, P=0.004$),且组内差异显著,呈现显著减少(摄入能: $F_{(4,45)} = 3.819, P=0.009$),其中第 28 天摄入能较第 1 天低 30.3%;而 LD 组摄入能组内差异不显著($P>0.05$) (图 3)。

2.3.2 排泄能

SD 组与 LD 组两组间的排泄能只在第 21 天表现出 SD 组排泄能明显较 LD 组个体少 39.1% ($F_{(1,17)} = 4.601, P=0.047$)。且 SD 组内排泄能随着驯化时间的延长明显的减少 ($F_{(4,45)} = 2.594, P=0.049$),第 28 天排泄能较第 1 天少 33%,但 LD 组组内排泄能无显著差异($P>0.05$) (图 4)。

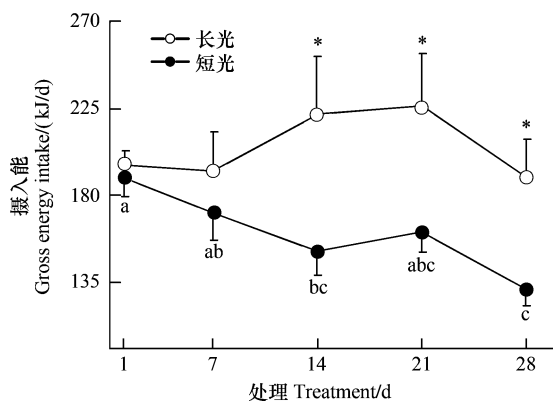


图 3 光周期对白头鹀摄入能的影响

Fig. 3 Effects of photoperiod on gross energy intake in Chinese bulbul

数据为平均值±标准误; * $P<0.05$ 长短光照组间差异; 不同字母 (a, b, c) 代表短光照组内差异

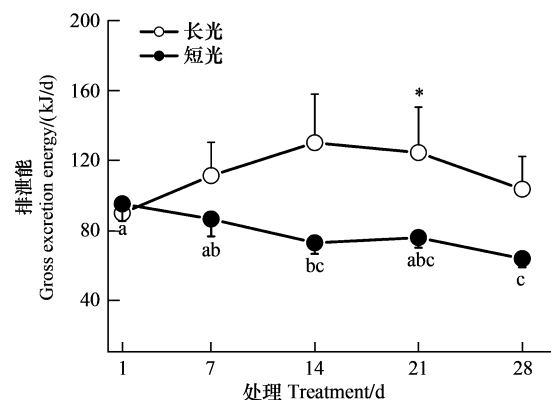


图 4 光周期对白头鹀排泄能的影响

Fig. 4 Effects of photoperiod on gross energy excrete in Chinese bulbul

数据为平均值±标准误; * $P<0.05$ 长短光照组间差异; 不同字母 (a, b, c) 代表短光照组内差异

2.3.3 同化能

在第 21 和 28 天时,SD 组白头鹀同化能分别显著低 LD 组 16.4% 和 20.9% (第 21 天: $F_{(1,17)} = 9.792, P=0.006$;第 28 天: $F_{(1,17)} = 5.002, P=0.039$)。SD 组与 LD 组的同化能在各自组内差异显著,都呈显著减少 (SD 组: $F_{(4,45)} = 3.511, P=0.014$;LD 组: $F_{(4,45)} = 4.114, P=0.006$),其中 SD 组和 LD 组的同化能分别在第 28 天较各自第 1 天少 27.5% 与 18.5% (图 5)。

2.3.4 同化率

SD 组和 LD 组两组间同化率在第 7—21 天表现出差异显著,SD 组同化率在第 7 天、14 天及 21 天分别显著高出 LD 组 11.5%、15.4% 及 10% (第 7 天: $F_{(1,17)} = 5.363, P=0.033$;第 14 天: $F_{(1,17)} = 9.830, P=0.006$;第

21 天: $F_{(1,17)} = 5.705, P = 0.0029$)。而 SD 组和 LD 组白头鹎的各自组内同化率无显著差异 ($P > 0.05$) (图 6)。

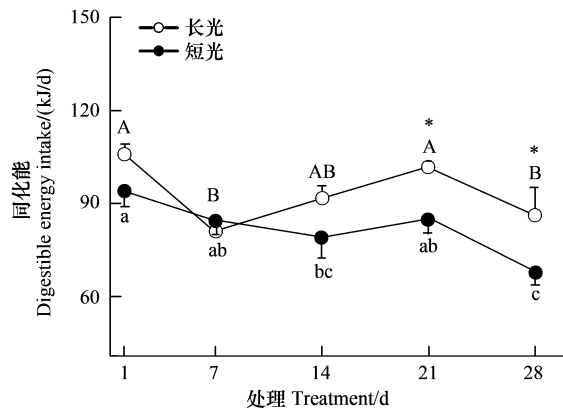


图 5 光周期对白头鹎同化能的影响

Fig. 5 Effects of photoperiod on digestible energy intake in Chinese bulbul

数据为平均值±标准误; * 长短光照组间差异; 不同字母 (A, B) 或 (a, b, c) 分别代表长光照组和短光照组内差异内差异

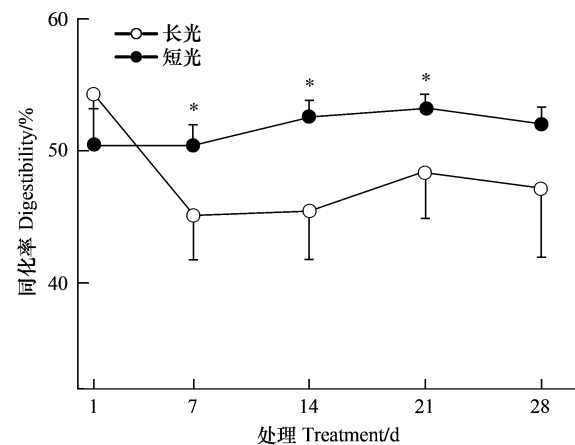


图 6 光周期对白头鹎同化率的影响

Fig. 6 Effects of photoperiod on digestibility in Chinese bulbul

数据为平均值±标准误, * $P < 0.05$

3 讨论

3.1 光周期与白头鹎体重、器官重量及能量收支的变化

体重是能量摄入和能量消耗最终平衡的结果。已有研究证明鸟类的体重受许多内外因子的影响,如温度、光照、食物质量及鸟类自身生理状态等^[41-43],而相应引起的鸟类体重的变化则是鸟类对环境的一种重要适应。许多留鸟在冬季会采取增重的策略,且体重达全年的最高水平,以应对冬季恶劣的环境条件^[38,44]。在本研究中,白头鹎在不同的光周期下表现出了体重差异,且短光照下的个体体重显著高出长光照下白头鹎体重 11.8%。自然条件下冬季由于食物缺乏、气候寒冷等原因,动物需储存大量的能量以应对恶劣的环境。本研究中 16h 黑暗及 8h 光照的实验室条件,与自然条件下冬季的光周期相似,所以在自然条件下,白头鹎有可能表现出类似于光周期变化的实验室条件下的体重变化,即增加体重来应对光照时间较短的冬季不良环境,而这一点在白头鹎和其他小型鸟类的体重季节性适应的研究中已得到证实。张国凯等^[38]通过比较白头鹎体重的季节性变化,发现白头鹎夏季的体重最低,但冬季的体重却增加到了最高值,Zheng 等人^[37]也研究发现白头鹎冬季的体重较夏季高出 29%。在自然环境中,生活在低温、短光照的冬季或寒冷环境的小型鸟类其体重往往高于生活于高温、长光照的夏季或温暖环境中鸟类的体重^[10,45-46],而冬季增加体重这一方式既是鸟类冬季体温调节的需要,也是其短时间内应对恶劣环境条件的一种重要缓冲作用^[10,47-48]。

在本研究中,虽然两实验组白头鹎组间排泄能只在第 21 天表现出显著差异,但 SD 组个体排泄能总体低于 LD 组白头鹎;另外,在驯化过程中,SD 组白头鹎的摄入能、同化能也都显著低于 LD 组个体,但同化率显著高于 LD 组白头鹎,且在短光照的刺激影响下,组内各能量指标值显著下降,而长光照下白头鹎的组内摄入能及同化能基本无显著变化。这些结果表明光周期变化对白头鹎的能量收支产生了影响,类似结果在小型啮齿动物的研究中也见有报道^[24,27-28,49]。同时本研究结果也表明了短光照较长光照更能刺激白头鹎能量收支的变化。对于动物来说,其能量的摄入、处理及其分配速率与效率会直接影响动物的生存能力^[50],而消化能或同化能受其本身的消化道容积及食物在消化道内的通过速率的影响^[51],所以消化率或同化率也间接受到消化道变化的影响。本研究中 SD 组白头鹎摄入能低于 LD 组个体,且同化能也较低,但相比之下,短光照下白头鹎同化率却高于 LD 组个体。动物在环境或生理压力影响下,必须通过增加摄食量及消化率来满足代谢需求。在消化策略上,动物可能采取加大消化道容量或延长滞留时间以提高消化率或同化率或者加快食物周转

速度等方式以获取更多的能量^[52]。如果不存在其他调节,摄食量的增加会缩短食物在消化道内的滞留时间,从而导致同化率降低^[51]。这一点也部分解释了在本研究中,虽然 LD 组白头鹀摄食量高于 SD 组个体,但其消化系统各部分未显著高于短光照个体,从而表现出同化率低于短光照白头鹀的原因;而相反,虽然 SD 组内白头鹀摄食量显著低于 LD 组个体,但其消化道重量,尤其是小肠重量明显高于 LD 组白头鹀,而小肠又是食物消化吸收的主要场所,其不仅重量和活性对动物的能量收支有重要的贡献^[53-54],且形态及生理特征的适应性改变对动物的能量平衡维持也有着重要的作用^[55],引发白头鹀具有较高的食物消化吸收,导致同化率较高,从而在一定程度上可能弥补了由于摄入能较低所导致代谢能低的问题,类似结果在小型哺乳动物的研究中也见有报道,如 Zhao 等人^[56]研究发现以高脂食物为食的布氏田鼠摄入能与消化能虽低,但消化率却较高,在能量上起着一定的补偿作用。同时本研究这一结果也表明了鸟类消化道的表型可塑性对鸟类能量的摄取吸收有着重要的作用。许多研究已证明,环境中食物质量的改变、鸟类的不同食性及迁徙等因素会影响鸟类消化道的生理特征变化,为了提高对食物的消化吸收,鸟类往往会增加消化道的体积或长度,即表现出消化道表型可塑性,以满足能量需要。如 Starck 和 Rahmaan^[57]通过比较食物质量变化对日本鹌鹑(*Coturnix coturnix japonica*)消化道影响,发现进食低质食物的日本鹌鹑的消化道明显增加;而食性不同的鸟类消化道也会存在差异,如李铭和柳劲松^[58]研究发现植食性鸟——普通朱雀(*Carpodacus erythrinus*)消化道相对较长,而食虫鸟——红点颏(*Luscinia calliope*)和红喉姬鹀(*Ficedula parva*)的消化道重量相对较高;McWilliams 和 Karasov^[59]总结报道了消化系统的表型可塑性变化对迁徙鸟类适应迁徙途中的高能量消耗有着重要的作用。类似的结果在小型哺乳动物领域中也见有报道,如 Zhao 和 Wang^[60]及 Liu 和 Wang^[55]研究发现长爪沙鼠(*Meriones unguiculatus*)会因食物质量的下降而增大消化道从而增加能量吸收及转化;鲍毅新等^[61]比较了不同环境温度对社鼠(*Niviventer confucianus*)食物同化的影响,发现低温环境下社鼠的摄入能较高,但消化率没有下降,而杜卫国等^[62]证明了社鼠的消化道大小存在季节的差异,从而说明了消化道容积或消化生理学的变化是社鼠在增加摄入能的情况下维持较高消化率的一个重要因素;王德华等^[63]研究报道了根田鼠消化道的变化及适应,认为消化道形态及容量的调节是消化对策中一个重要的方面,是维持消化率水平的重要因素之一。另外,食物消化吸收增加,同时也意味着动物机体最大的消化腺——肝脏的代谢活动也会相应的增强,而研究中发现 SD 组白头鹀肝脏重量显著高于长光照个体,与消化吸收活动的增加相符合。本研究的这一结果与张国凯等^[38]在白头鹀器官重量季节性变化研究中发现的冬季小肠重量达到全年最高水平的研究结果相一致,也同时表明了光周期变化是白头鹀器官重量季节性变化的主要因素之一。

3.2 光周期与白头鹀代谢率的变化

鸟类对环境变化较为敏感,维持最适能量平衡是其重要的生存对策之一,而代谢率是衡量其能量代谢水平的一个重要生理指标^[8]。迄今为止,国内外已见有很多鸟类代谢率的相关研究报道,发现鸟类的代谢率与环境变化有着广泛的联系^[5],比如环境中食物质量^[64]、栖息地^[65]、蛰伏(torpor)^[66]、迁徙^[67]等因素对鸟类代谢率都有着重要影响,其中气候的季节性变化也是影响代谢率的主要因素之一。目前很多研究表明鸟类的代谢率有明显的季节变化,且一般冬季代谢率高于夏季代谢率^[17-19,37,43,45,68],但也有研究发现一些鸟类的 BMR 未表现出季节性变化^[20,69-70]。

“中心限制假说”和“外周限制假说”认为,代谢率既受到中心效应器官的限制,又与支持中心效应器官的外周器官相关联^[71]。动物的 BMR 是代谢较为活跃的器官如心脏、脑、消化道、肝脏和肾脏等及肌肉组织代谢率的总和^[10,43],研究表明这些代谢器官及肌肉组织的代谢活动对动物的 BMR 有着明显的作用^[46,72]。其中机体在静止状态下,69%的热量来自于内脏器官和肌肉,而肝脏在总代谢中占据了 20%,是动物产热的重要器官^[46,73];消化道是能将能量转化为可利用形式的重要器官,其中肠道具有很高的代谢活性,消化道重量的增加可提高对营养物质的吸收率,从而更加有效的利用食物资源,满足动物的能量代谢需求^[24];Daan 等^[74]研究统计了 22 种鸟的数据,发现心脏和肾脏的合重能解释 50% BMR 变化的原因,并认为相似体积的不同物种间 BMR 的差异反应了其代谢器官的进化情况,推断种间 BMR 的差异是代谢活性器官重量差异造成的。所以这

些相关产热器官质量的增加必然引起 BMR 代谢水平的显著提高,即 BMR 与这些器官重量存在一定的相关性。本研究,SD 组白头鹎的 BMR 显著高于 LD 组个体,而其内部器官同样有着相应的变化,其中 SD 组白头鹎的肝脏、小肠的重量显著高于 LD 组个体,心脏、肾、总体消化道等重要的产热器官重量虽未表现出统计学上的差异,但总体也略高于 LD 组白头鹎,这些结果说明了白头鹎的 BMR 与肝、小肠等内部器官有着显著的相关性,验证了中心器官是提高 BMR 的基础之一的理论。Liu 和 Li^[68]及张国凯等^[38]在对树麻雀、白头鹎 BMR 和肝、心和消化道等内部器官的研究中也得出类似的结论。另外,体重也是影响动物 BMR 的一个重要因素^[75],许多研究表明小型鸟类体重的增加会伴随着代谢率的增加^[43,46]。本研究中短光照下白头鹎体重明显高于长光照下个体,结合中心器官重量的增加,最终导致短光照下白头鹎 BMR 显著高于长光照下个体,表现出的 BMR 光周期变化与白头鹎代谢率的季节性变化相似^[37-38],表明了自然条件下光周期变化是白头鹎产热代谢变化的一个重要原因,其中短光照是引起白头鹎体重和中心器官重量增加的信号之一,而这些重量的增加又是引起 BMR 升高的主要原因之一。

基础代谢产热是动物专性产热中的一种化学产热,其热能来自细胞内代谢,即细胞内线粒体呼吸和氧化磷酸化作用,所以动物的产热能力与线粒体蛋白含量和线粒体内酶的活性有着密切的联系^[76],目前已有研究表明光周期变化影响动物的肝脏及肌肉线粒体蛋白含量及呼吸酶活性^[23,46]。推测,白头鹎在光周期变化中代谢率的变化,除了由整体组织水平上体重和器官重量的适应变化引起外,其细胞内线粒体蛋白含量及酶的活性也发生了变化,综合作用最终导致短光下白头鹎代谢水平显著高于长光照下个体,但这一猜测还需进一步的实验研究才能得以论证,有关光周期变化对白头鹎代谢水平有关生理指标的影响还有待进一步研究。

在自然环境中,除了光照条件,还存在温度、食物资源及质量等其他环境因子,动物对由气候变化引起环境条件变化的适应往往是多个环境因子综合作用的结果,而且研究证明温度^[4,77-78]、食物资源及质量^[60,79-82]等都是影响动物能量代谢的重要因素。虽然本研究表明,光周期驯化中白头鹎代谢率表现出类似于自然环境中白头鹎代谢率季节性显著变化特点,但未能说明有关光周期变化是否是引起白头鹎代谢率变化的必要因素,白头鹎代谢率变化是由光周期单一变化作用引起,还是与其他环境因子综合作用导致等问题,而这些问题都有待进一步探究以更好地了解小型鸟类的产热代谢适应及机理。

另外,白头鹎曾被视为典型的东洋界鸟类,但在全球气候变暖的大趋势下,目前有研究发现白头鹎种群在向北扩散^[35,83]。生理可塑性是鸟类能量代谢的一个基本特征^[10,84],结合本研究结果,短光照下白头鹎代谢率较长光照下个体高,说明其产生了生理可塑性变化,在能量代谢水平上适应了环境光周期变化,是其迁往北方地区并适应短光照环境的一个重要生理生态学特征。

总之,光周期对白头鹎的体重、器官重量、BMR 及能量收支产生了影响,其中短光照较长光照更能引起白头鹎体重、器官重量及能量代谢的明显变化,同时验证了“中心限制假说”,即白头鹎 BMR 与中心器官代谢(肝、小肠等)具有相关性,中心器官是改变白头鹎 BMR 的主要原因之一。

致谢 感谢中国科学院动物研究所王德华博士和北京师范大学生命科学院李庆芬教授提供 Kalabukhov 呼吸测定仪。

References:

- [1] Himms-Hagen J. Brown adipose tissue thermogenesis: role in thermoregulative, energy regulation and obesity // Schonbaum E, Lomax P, eds. Thermoregulation: Physiology and Biochemistry. New York: Pergamon Press, 1990: 327-414.
- [2] Lowell B B, Spiegelman B M. Towards a molecular understanding of adaptive thermogenesis. *Nature*, 2000, 404(6778): 652-660.
- [3] Liu J S, Yang M, Sun R Y, Wang D H. Adaptive thermogenesis in Brandt's vole (*Lasiopodomys brandti*) during cold and warm acclimation. *Journal of Thermal Biology*, 2009, 34(2): 60-69.
- [4] McKechnie A E. Phenotypic flexibility in basal metabolic rate and the changing view of avian physiological diversity: a review. *Journal of Comparative Physiology B*, 2008, 178(3): 235-247.
- [5] McNab B K. Ecological factors affect the level and scaling of avian BMR. *Comparative Biochemistry and Physiology A*, 2009, 152(1): 22-45.
- [6] Degen A A. *Ecophysiology of Small Desert Mammals*. New York: Springer-Verlag, 1997: 296.
- [7] Zhang Y P, Liu J S, Hu X J, Yang Y, Chen L D. Metabolism and thermoregulation in two species of passerines from south-eastern China in

- summer. *Acta Zoologica Sinica*, 2006, 52(4): 641-647.
- [8] Lovegrove B G. The influence of climate on the basal metabolic rate of small mammals; a slow-fast metabolic continuum. *Journal of Comparative Physiology B*, 2003, 173(2): 87-112.
- [9] Lovegrove B G, Smith G A. Is 'nocturnal hypothermia' a valid physiological concept in small birds?: a study on Bronze Mannikins *Spermestes cucullatus*. *The American Naturalist*, 2003, 145(4): 547-557.
- [10] Klaassen M, Oltrogge M, Trost L. Basal metabolic rate, food intake, and body mass in cold- and warm- acclimated Garden Warblers. *Comparative Biochemistry and Physiology A*, 2004, 137(4): 639-647.
- [11] Bromage N, Porter M, Randell C. The environmental regulation of maturation in farmed finfish with special reference to the role of photoperiod and melatonin. *Aquaculture*, 2001, 197(1/4): 63-98.
- [12] Nelson R J, Demas G E. Role of melatonin in mediating seasonal energetic and immunologic adaptations. *Brain Research Bulletin*, 1997, 44(4): 423-430.
- [13] Bowden T J. Modulation of the immune system of fish by their environment. *Fish & Shellfish Immunology*, 2008, 25(4): 373-383.
- [14] Ouyang Y, Andersson C R, Kondo T, Golden S S, Johnson C H. Resonating circadian clocks enhance fitness in cyanobacteria. *Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America*, 1998, 95(15): 8660-8664.
- [15] McKechnie A E, Chetty K, Lovegrove B G. Phenotypic flexibility in the basal metabolic rate of laughing doves: responses to short-term thermal acclimation. *Journal of Experimental Biology*, 2007, 210(1): 97-106.
- [16] Bush N G, Brown M, Downs C T. Effects of short-term acclimation on thermoregulatory responses of the rock kestrel, *Falco rupicolus*. *Journal of Thermal Biology*, 2008, 33(8): 425-430.
- [17] Arens J R, Cooper S J. Metabolic and ventilatory acclimatization to cold stress in house sparrows (*Passer domesticus*). *Physiological and Biochemical Zoology*, 2005, 78(4): 579-589.
- [18] Lindsay C, Downs C, Brown M. Physiological variation in amethyst sunbirds (*Chalcomitra amethystina*) over an altitudinal gradient in summer. *Journal of Thermal Biology*, 2009, 34(4): 190-199.
- [19] Lindsay C, Downs C, Brown M. Physiological variation in amethyst sunbirds (*Chalcomitra amethystina*) over an altitudinal gradient in winter. *Journal of Experimental Biology*, 2009, 212(4): 483-493.
- [20] Doucette L I, Geiser F. Seasonal variation in thermal energetics of the Australian owl- nightjar (*Aegotheles cristatus*). *Comparative Biochemistry and Physiology A*, 2008, 151(4): 615-620.
- [21] Mercer J G, Lawrence C B, Moar K M, Atkinson T, Barrett P. Short-day weight loss and effect of food deprivation on hypothalamic NPY and CRF mRNA in Djungarian hamsters. *American Journal of Physiology*, 1997, 273(2): 768-776.
- [22] Haim A, Shabtay A, Arad Z. The thermoregulatory and metabolic responses to photoperiod manipulations of the Macedonian mouse (*Mus macedonicus*), a post-fire invader. *Journal of Thermal Biology*, 1999, 24(4): 279-286.
- [23] Zhao Z J, Wang D H. Short photoperiod enhances thermogenic capacity in Brandt's voles. *Physiology Behavior*, 2005, 85(2): 143-149.
- [24] Song Z G, Wang D H. Basal metabolic rate and organ size in Brandt's voles (*Lasiopodomys brandtii*): effects of photoperiod, temperature and diet quality. *Physiology & Behavior*, 2006, 89(5): 704-710.
- [25] Lu Q, Zhong W Q, Wang D H. Effects of photoperiod history on body mass and energy metabolism in Brandt's voles (*Lasiopodomys brandtii*). *Journal of Experimental Biology*, 2007, 210(21): 3838-3847.
- [26] Li X S, Wang D H. Seasonal adjustments in body mass and thermogenesis in Mongolian gerbils (*Meriones unguiculatus*): the roles of short photoperiod and cold. *Journal of Comparative Physiology B*, 2005, 175(8): 593-600.
- [27] Li X S, Wang D H, Yang J C. Effect of photoperiod on body weight and energy metabolism in Brandt's voles (*Microtus brandtii*) and Mongolian Gerbils (*Meriones unguiculatus*). *Acta Theriologica Sinica*, 2003, 23(4): 304-311.
- [28] Wang J M, Zhang Y M, Wang D H. Photoperiodic regulation in energy intake, thermogenesis and body mass in root voles (*Microtus oeconomus*). *Comparative Biochemistry and Physiology A*, 2006, 145(4): 546-553.
- [29] Zhao Z J, Wang D H. Short photoperiod influences energy intake and serum leptin level in Brandt's voles (*Microtus brandtii*). *Hormones and Behavior*, 2006, 49(4): 463-469.
- [30] Li Q F, Huang C X, Liu X T. Effects of photoperiod and temperature on thermogenesis in Brandt's voles (*Microtus brandtii*). *Acta Zoologica Sinica*, 1995, 41(4): 362-369.
- [31] Nicholls T J, Follett B K, Robinson J E. A photoperiodic response in gonadectomized Japanese quail exposed to a single long day. *Journal of Endocrinology*, 1983, 97(1): 121-126.
- [32] Dawson A, Sharp P J. Photorefractoriness in birds—photoperiodic and non-photoperiodic control. *General and Comparative Endocrinology*, 2007, 153(1/3): 378-384.
- [33] Moore C B, Siopes T D. Effects of lighting conditions and melatonin supplementation on the cellular and humoral immune responses in Japanese quail *Coturnix coturnix japonica*. *General and Comparative Endocrinology*, 2000, 119(1): 95-104.
- [34] Saarela S, Heldmaier G. Effect of photoperiod and melatonin on cold resistance, thermoregulation and shivering / nonshivering thermogenesis in Japanese quail. *Journal of Comparative Physiology B*, 1987, 157(5): 509-518.
- [35] Song Z M. A New bird record in Northeast; *Pycnonotus sinensis*. *Journal of Mudanjiang Normal University: Natural Science*, 2006, 54(4): 1-2.

- [36] Zheng G M, Zhang C Z. Birds in China. Beijing: China Forestry Publishing House, 2002.
- [37] Zheng W H, Liu J S, Jiang X H, Fang Y Y, Zhang G K. Seasonal variation on metabolism and thermoregulation in Chinese bulbul. *Journal of Thermal Biology*, 2008, 33(6): 315-319.
- [38] Zhang G K, Fang Y Y, Jiang X H, Liu J S, Zhang Y P. Adaptive plasticity in metabolic rate and organ masses among *Pycnonotus sinensis*, in seasonal acclimatization. *Chinese Journal of Zoology*, 2008, 43(4): 13-19.
- [39] Górecki A. Kalabukhov-Skvortsov respirometer and resting metabolic rate measurement// Grodziński W, Klekowski R Z, Duncan A, eds. *Methods for Ecological Bioenergetics*. Oxford: Blackwell Scientific, 1975: 309-313.
- [40] Grodzinski W, Wunder B A. Ecological energetics of small mammals// Golley F B, Petruszewicz K, Ryszkowski L, eds. *Small Mammals: Their Productivity and Population Dynamics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1975: 173-204.
- [41] Mata A, Massemin-Challet S, Caloin M, Michard-Picamelot D, Le Maho Y. Seasonal variation in energy expenditure and body composition in captive White Storks (*Ciconia ciconia*). *Comparative Biochemistry and Physiology A*, 2010, 155(1): 19-24.
- [42] Liknes E T, Swanson D L. Seasonal variation in cold tolerance, basal metabolic rate, and maximal capacity for thermogenesis in White-breasted Nuthatches *Sitta carolinensis* and Downy Woodpeckers *Picoides pubescens*, two unrelated arboreal temperate residents. *Journal of Avian Biology*, 1996, 27(4): 279-288.
- [43] Liu J S, Li M, Shao S L. Seasonal changes in thermogenic properties of liver and muscle in tree sparrows *Passer montanus*. *Acta Zoologica Sinica*, 2008, 54(5): 777-784.
- [44] Koenig W D, Walters E L, Walters J R, Kellam J S, Michalek K G, Schrader M S. Seasonal body weight variation in five species of woodpeckers. *The Condor*, 2005, 107(4): 810-822.
- [45] Chamane S C, Downs C T. Seasonal effects on metabolism and thermoregulation abilities of the Red-winged Starling (*Onychognathus morio*). *Journal of Thermal Biology*, 2009, 34(7): 337-341.
- [46] Zheng W H, Li M, Liu J S, Shao S L. Seasonal acclimatization of metabolism in Eurasian tree sparrows (*Passer montanus*). *Comparative Biochemistry and Physiology A*, 2008, 151(4): 519-525.
- [47] O'Connor T P. Metabolic characteristics and body composition in house finches: effects of seasonal acclimatization. *Journal of Comparative Physiology B*, 1995, 165(4): 298-305.
- [48] Vézina F, Petit M, Buehler D M, Dekinga A, Piersma T. Limited access to food and physiological trade-offs in a long-distance migrant shorebird. I. Energy metabolism, behavior, and body-mass regulation. *Physiological and Biochemical Zoology*, 2009, 82(5): 549-560.
- [49] Klingenspor M, Niggemann H, Heldmaier G. Modulation of leptin sensitivity by short photoperiod acclimation in the Djungarian hamster *Phodopus sungorus*. *Journal of Comparative Physiology B*, 2000, 170(1): 37-43.
- [50] Karasov W H. Energetics, physiology, and vertebrate ecology. *Trends in Ecology & Evolution*, 1986, 1(4): 101-104.
- [51] Gross J E, Wang Z W, Wunder B A. Effects of food quality and energy needs: Changes in gut morphology and capacity of *Microtus ochrogaster*. *Journal of Mammalogy*, 1985, 66(4): 661-667.
- [52] Song Z G, Wang D H. Maximum energy assimilation rate in Brandt's vole (*Microtus brandti*) from inner Mongolia grassland. *Acta Theriologica Sinica*, 2001, 21(4): 271-278.
- [53] Cant J P, McBride B W, Croom W J. The regulation of intestinal metabolism and its impact on whole animal energetics. *Journal of Animal Science*, 1996, 74(10): 2541-2553.
- [54] Song Z G, Wang D H. Relationship between metabolic rates and body composition in the Mongolian gerbils (*Meriones unguiculatus*). *Acta Zoologica Sinica*, 2002, 48(4): 445-451.
- [55] Liu Q S, Wang D H. Effects of diet quality on phenotypic flexibility of organ size and digestive function in Mongolian gerbils (*Meriones unguiculatus*). *Journal of Comparative Physiology B*, 2007, 177(5): 509-518.
- [56] Zhao Z J, Chen J F, Wang D H. Diet-induced obesity in the short-day-lean Brandt's vole. *Physiology & Behavior*, 2010, 99(1): 47-53.
- [57] Starck J M, Rahmaan G H A. Phenotypic flexibility of structure and function of the digestive system of Japanese quail. *The Journal of Experimental Biology*, 2003, 206(11): 1887-1897.
- [58] Li M, Liu J S. Digestive tract morphological observation of four passerine birds. *Chinese Journal of Zoology*, 2008, 43(1): 116-121.
- [59] McWilliams S R, Karasov W H. Phenotypic flexibility in digestive system structure and function in migratory birds and its ecological significance. *Comparative Biochemistry and Physiology A*, 2001, 128(3): 577-591.
- [60] Zhao Z J, Wang D H. Plasticity in the physiological energetics of Mongolian gerbils is associated with diet quality. *Physiological and Biochemical Zoology*, 2009, 82(5): 504-515.
- [61] Bao Y Z, Du W G, Lin Z, Hu B Y, Chi B R, Chen X D. Effect of temperature on energy requirement and food assimilation in Chinese white-bellied rat (*Niviventer confucianus*). *Acta Zoologica Sinica*, 2001, 47(5): 579-600.
- [62] Du W G, Bao Y X, Yu H Y, Shi L Q. Seasonal variations in length and weight of digestive tract in *Rattus niviventer confucianus*. *Acta Zoologica Sinica*, 1998, 44(1): 112-114.
- [63] Wang D H, Wang Z W, Sun R Y. Variations in digestive tract morphology in root vole (*Microtus oeconomus*) and its adaptive significance. *Acta Theriologica Sinica*, 1995, 15(1): 53-59.
- [64] McNab B K. Food habits and the evolution of energetics in birds of paradise (Paradisaeidae). *Journal of Comparative Physiology B*, 2005, 175

- (2): 117-132.
- [65] Wiersma P, Muñoz-Garcia A, Walker A, Williams J B. Tropical birds have a slow pace of life. *Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America*, 2007, 104(22): 9340-9345.
- [66] Merola-Zwartjes M, Ligon J D. Ecological energetics of the Puerto Rican tody: heterothermy, torpor, and intra-island variation. *Ecology*, 2000, 81(4): 990-1003.
- [67] Piersma T, Bruinzeel L, Drent R, Kersten M, van der Meer J, Wiersma P. Variability in basal metabolic rate of a long-distance migrant shorebird (red knot, *Calidris canutus*) reflects shifts in organ sizes. *Physiological Zoology*, 1996, 69(1): 191-217.
- [68] Liu J S, Li M. Phenotypic flexibility of metabolic rate and organ masses among tree sparrows *Passer montanus* in seasonal acclimatization. *Acta Zoologica Sinica*, 2006, 52(3): 469-477.
- [69] Bush N G, Brown M, Downs C T. Seasonal effects on thermoregulatory responses of the Rock Kestrel, *Falco rupicolis*. *Journal of Thermal Biology*, 2008, 33(7): 404-412.
- [70] Smit B, Brown M, Downs C T. Thermoregulatory responses in seasonally acclimatized captive Southern White-faced Scops-owls. *Journal of Thermal Biology*, 2008, 33(2): 76-86.
- [71] Chappell M A, Bech C, Buttemer W A. The relationship of central and peripheral organ masses to aerobic performance variation in house sparrows. *Journal of Experimental Biology*, 1999, 202(17): 2269-2279.
- [72] Liu J S, Sun R Y, Wang D H. Thermogenic properties in three rodent species from Northeastern China in summer. *Journal of Thermal Biology*, 2006, 31(1/2): 172-176.
- [73] Rolfe D F S, Brown G C. Cellular energy utilization and molecular origin of standard metabolic rate in mammals. *Physiological Reviews*, 1997, 77(3): 731-758.
- [74] Daan S, Masman D, Groenewold A. Avian basal metabolic rates: their association with body composition and energy expenditure in nature. *American Journal of Physiology*, 1990, 259(2): 333-340.
- [75] McNab B K. Ecological factors influence energetics in the Order Carnivora. *Acta Zoologica Sinica*, 2005, 51(4): 535-545.
- [76] Rasmussen U F, Vielwerth S E, Rasmussen H N. Skeletal muscle bioenergetics: a comparative study of mitochondria isolated from pigeon pectoralis, rat soleus, rat biceps brachii, pig biceps femoris and human quadriceps. *Comparative Biochemistry and Physiology A*, 2004, 137(2): 435-446.
- [77] Collin A, Buyse J, van As P, Darras V M, Malheiros R D, Moraes V M B, Reyns G E, Taouis M, Decuyper E. Cold-induced enhancement of avian uncoupling protein expression, heat production and triiodothyronine concentrations in broiler chicks. *General and Comparative Endocrinology*, 2003, 130(1): 70-77.
- [78] Mujahid A. Acute cold-induced thermogenesis in neonatal chicks (*Gallus gallus*). *Comparative Biochemistry and Physiology A*, 2010, 156(1): 34-41.
- [79] Rogers C M. Predation risk and fasting capacity: do withering birds maintain optimal body mass. *Ecology*, 1987, 68(4): 1051-1061.
- [80] McNab B K. Food habits and the basal rate of metabolism in birds. *Oecologia*, 1988, 77(3): 343-349.
- [81] Liu J S, Wang D H, Wang Y, Chen M H, Song C G, Sun R Y. Energetics and thermoregulation of the *Carpodacus roseus*, *Fringilla montifringilla* and *Acanthis flammea*. *Acta Zoologica Sinica*, 2004, 50(3): 357-363.
- [82] Bozinovic F, Rojas J M, Broitman B R, Vásquez R A. Basal metabolism is correlated with habitat productivity among populations of degus (*Octodon degus*). *Comparative Biochemistry and Physiology A*, 2009, 152(4): 560-564.
- [83] Wang X P, Du M, Sun L X, Li J L. New distribution of Chinese bulbuls (*Pycnonotus sinensis*) in Lüshun of Dalian, China. *Zoological Research*, 2005, 26(1): 95.
- [84] Swanson D L, Garland T Jr. The evolution of high summit metabolism and cold tolerance in birds and its impact on present-day distributions. *Evolution*, 2009, 63(1): 184-194.

参考文献:

- [27] 李兴升,王德华,杨俊成. 光周期对布氏田鼠和长爪沙鼠体重和能量代谢的影响. *兽类学报*, 2003, 23(4): 304-311.
- [30] 李庆芬,黄晨西,刘小团. 光周期和温度对布氏田鼠产热的影响. *动物学报*, 1995, 41(4): 362-369.
- [35] 宋泽民. 东北鸟类新记录——白头鹀. *牡丹江师范学院学报(自然科学版)*, 2006, 54(4): 1-2.
- [38] 张国凯,方媛媛,姜雪华,柳劲松,张永普. 白头鹀的代谢率与器官重量在季节驯化中的可塑性变化. *动物学杂志*, 2008, 43(4): 13-19.
- [43] 柳劲松,李铭,邵淑丽. 树麻雀肝脏和肌肉产热特征的季节性变化. *动物学报*, 2008, 54(5): 777-784.
- [52] 宋志刚,王德华. 内蒙古草原布氏田鼠的最大同化能. *兽类学报*, 2001, 21(4): 271-278.
- [54] 宋志刚,王德华. 长爪沙鼠的代谢率与器官的关系. *动物学报*, 2002, 48(4): 445-451.
- [58] 李铭,柳劲松. 4种雀形目鸟消化道形态特征. *动物学杂志*, 2008, 43(1): 116-121.
- [61] 鲍毅新,杜卫国,林治,胡柏驿,池帮荣,陈孝端. 环境温度对社鼠能量需求和食物同化的影响. *动物学报*, 2001, 47(5): 579-600.
- [62] 杜卫国,鲍毅新,俞华英,施利强. 社鼠消化道长度和重量的季节变化. *动物学报*, 1998, 44(1): 112-114.
- [63] 王德华,王祖望,孙儒泳. 根田鼠消化道长度和重量的变化及其适应意义. *兽类学报*, 1995, 15(1): 53-59.
- [83] 王小平,杜敏,孙立新,李建立. 大连旅顺老铁山发现白头鹀. *动物学研究*, 2005, 26(1): 95.

CONTENTS

Influences of elevated ozone on growth and C, N, S allocations of rice	ZHENG Feixiang, WANG Xiaoke, HOU Peiqiang, et al (1479)
Coexistence, biodiversity and roles of ammonia-oxidizing archaea and anaerobic ammonium-oxidizing bacteria in deep soil layer of high nitrogen loaded paddy field	WANG Yu, ZHU Guibing, WANG Chaoyu, et al (1487)
The impact of interannual climate variability on the mean global vegetation distribution	SHAO Pu, ZENG Xiaodong (1494)
Labile and recalcitrant carbon and nitrogen pools of an alpine meadow soil from the eastern Qinghai-Tibetan Plateau subjected to experimental warming and grazing	WANG Bei, SUN Geng, LUO Peng, et al (1506)
The structure and species diversity of plant communities in ecological safety islands of urban Guangzhou	MO Dan, GUAN Dongsheng, HUANG Kangyou, et al (1515)
The growth pattern of <i>Pinus elliottii</i> Plantation in central subtropical China	MA Zeqing, LIU Qijing, WANG Huimin, et al (1525)
The effect of two wetland plants on nitrogen and phosphorus removal from the simulated paddy field runoff in two small-scale Subsurface Flow Constructed Wetlands	LIU Shuyuan, YAN Baixing, WANG Lixia (1538)
Effect of simulated nitrogen deposition on nutrient release in decomposition of several litter fractions of two bamboo species	TU Lihua, HU Tingxing, ZHANG Jian, et al (1547)
Ecological monitoring of bryophytes for mercury pollution in Danzhai Mercury Mine Area, Guizhou Province, China	LIU Rongxiang, WANG Zhihui, ZHANG Zhaohui (1558)
Influence of silt deposition and sand deposition on <i>Cynodon dactylon</i> population in low-water-level-fluctuating zone of the Three Gorges Reservoir	LI Qiang, DING Wuquan, ZHU Qihong, et al (1567)
Seed production of <i>Spartina alterniflora</i> and its response of germination to temperature at Chongming Dongtan, Shanghai	ZHU Zhenchang, ZHANG Liquan, XIAO Derong (1574)
Effects of decomposition of mixed leaf litters of the <i>Castanopsis platyacantha</i> - <i>Schima sinensis</i> forest on soil organic carbon	ZHANG Xiaopeng, PAN Kaiwen, WANG Jinchuang, et al (1582)
Effects of desertification on soil respiration and ecosystem carbon fixation in Mu Us sandy land	DING Jinzhi, LAI Liming, ZHAO Xuechun, et al (1594)
The spatial distribution of soil organic carbon and its influencing factors in hilly region of the Loess Plateau	SUN Wenyi, GUO Shengli (1604)
Effects of interspecific interactions and nitrogen fertilization rates on above- and below- growth in faba bean/mazie intercropping system	LI Yuying, HU Hansheng, CHENG Xu, et al (1617)
Effects of supplemental irrigation based on measured soil moisture on nitrogen accumulation, distribution and grain yield in winter wheat	HAN Zhanjiang, YU Zhenwen, WANG Dong, et al (1631)
Anti-soil background capacity with vegetation biochemical component spectral model	SUN Lin, CHENG Lijuan (1641)
Spatial distribution of arbuscular mycorrhizal fungi and glomalin of <i>Hippophae rhamnoides</i> L in farming-pastoral zone from the two northern provinces of China	HE Xueli, CHEN Cheng, HE Bo (1653)
Study on optimum forest coverage for water conservation: a case study in Pingtonghe watershed (Pingwu section)	ZHU Zhifang, GONG Gutang, CHEN Junhua, et al (1662)
Spatial point analysis of fire occurrence and its influence factor in Huzhong forest area of the Great Xing'an Mountains in Heilongjiang Province, China	LIU Zhihua, YANG Jian, HE Hongshi, et al (1669)
Combustion efficiency of small-scale meadow fire in Daxinganling Mountains	WANG Mingyu, SHU Lifu, SONG Guanghui, et al (1678)
Community structure of demersal fish in Nature Reserve of <i>Acipenser sinensis</i> in Yangtze River estuary	ZHANG Tao, ZHUANG Ping, ZHANG Longzhen, et al (1687)
Behavioral responses of the Common Coots (<i>Fulica atra</i>) and other swimming birds to human disturbances	ZHANG Weiwei, MA Jianzhang, LI Jinbo (1695)
Effects of photoperiod on body mass, organ masses and energy metabolism in Chinese bulbul (<i>Pycnonotus sinensis</i>)	NI Xiaoying, LIN Lin, ZHOU Feifei, et al (1703)
Larval host types for the 3 rd <i>Helicoverpa armigera</i> in Bt cotton field from North China determined by $\delta^{13}\text{C}$	YE Lefu, FU Xue, XIE Baoyu, et al (1714)
Selectivity of <i>Frankliniella occidentalis</i> to vegetable hosts	YUAN Chengming, ZHI Junrui, CAO Yu, et al (1720)
Genetic structure of <i>Pine caterpillars</i> (<i>Dendrolimus</i>) populations based on the analysis of Cyt b gene sequences	GAO Baojia, ZHANG Xuwei, ZHOU Guona, et al (1727)
Pricing method and application effects of biogas slurry	ZHANG Changai, LIU Ying, CAO Man, WANG Yanqin, et al (1735)
Effects of compost from municipal solid waste on ecological characteristics and the quality of different turfgrass cultivars	ZHAO Shulan, LIAN Fei, DUO Li'an (1742)
Degradation kinetics and bioavailability of pentachlorophenol in paddy soil-rice plant ecosystem	WANG Shisheng, LI Depeng (1749)
Review and Monograph	
Concepts and techniques of landscape genetics	XUE Yadong, LI Li, WU Gongsheng, ZHOU Yue (1756)

2009 年度生物学科总被引频次和影响力因子前 10 名期刊*

(源于 2010 年版 CSTPCD 数据库)

排序 Order	期刊 Journal	总被引频次 Total citation	排序 Order	期刊 Journal	影响力因子 Impact factor
1	生态学报	11764	1	生态学报	1.812
2	应用生态学报	9430	2	植物生态学报	1.771
3	植物生态学报	4384	3	应用生态学报	1.733
4	西北植物学报	4177	4	生物多样性	1.553
5	生态学杂志	4048	5	生态学杂志	1.396
6	植物生理学通讯	3362	6	西北植物学报	0.986
7	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3327	7	兽类学报	0.894
8	MOLECULAR PLANT	1788	8	CELL RESEARCH	0.873
9	水生生物学报	1773	9	植物学报	0.841
10	遗传学报	1667	10	植物研究	0.809

★《生态学报》2009 年在核心版的 1964 种科技期刊排序中总被引频次 11764 次,全国排名第 1;影响力因子 1.812,全国排名第 14;第 1—9 届连续 9 年入围中国百种杰出学术期刊;中国精品科技期刊

编辑部主任: 孔红梅

执行编辑: 刘天星 段 靖

生态学报
(SHENGTAI XUEBAO)
(半月刊 1981 年 3 月创刊)
第 31 卷 第 6 期 (2011 年 3 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 31 No. 6 2011

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许可证	京海工商广字第 8013 号		

