

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第34卷 第10期 Vol.34 No.10 **2014**

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 34 卷 第 10 期 2014 年 5 月 (半月刊)

目 次

前沿理论与学科综述

- 景观可持续性与景观可持续性科学..... 赵文武,房学宁 (2453)
- 生态系统服务付费的诊断框架及案例剖析 朱文博,王 阳,李双成 (2460)
- 湿地植物根表铁膜研究进展..... 刘春英,陈春丽,弓晓峰,等 (2470)
- 水生生态环境中捕食信息素的生态学效应..... 覃光球,卢豪良,唐振柱,等 (2481)
- 脊椎动物传播植物肉质果中的次生物质及其生态作用 潘 扬,罗 芳,鲁长虎 (2490)

个体与基础生态

- 中亚热带天然林土壤 CH₄吸收速率对模拟 N 沉降的响应 陈朝琪,杨智杰,刘小飞,等 (2498)
- 塔里木盆地南缘早生芦苇生态特征与水盐因子关系..... 贡 璐,朱美玲,塔西甫拉提·特依拜,等 (2509)
- 黄刺玫叶片光合生理参数的土壤水分阈值响应及其生产力分级..... 张淑勇,夏江宝,张光灿,等 (2519)
- 亚热带杉木和米老排人工林土壤呼吸对凋落物去除和交换的响应..... 余再鹏,万晓华,胡振宏,等 (2529)
- 施钾提高蚜害诱导的小麦茉莉酸含量和叶片相关防御酶活性..... 王 祎,张月玲,苏建伟,等 (2539)
- 高浓度 O₃及太阳辐射减弱对冬小麦 PS II 光合活性及光能耗散的影响
..... 孙 健,郑有飞,吴荣军,等 (2548)
- 蜡样芽孢杆菌 B3-7 在大田小麦根部的定殖动态及其对小麦纹枯病的防治效果
..... 黄秋斌,张 颖,刘凤英,等 (2559)
- 有限供水下冬小麦全程耗水特征定量研究..... 张兴娟,薛绪掌,郭文忠,等 (2567)
- 抗真菌转基因水稻生态适合度评价..... 李 伟,郭建夫,袁红旭,等 (2581)
- 花生叶片蛋白组对 UV-B 辐射增强的响应 杜照奎,李钧敏,钟章成,等 (2589)
- 南海南部悬浮颗粒物脂肪酸组成..... 刘华雪,柯常亮,李纯厚,等 (2599)
- 年龄、集群、生境及天气对鄱阳湖白鹤越冬期日间行为模式的影响..... 袁芳凯,李言阔,李凤山,等 (2608)
- [树]麻雀羽再生的能量预算和水代谢散热调节 杨志宏,吴庆明,杨 渺,等 (2617)
- 低剂量杀虫剂对星豹蛛捕食效应的影响及其机理 李 锐,李 娜,刘 佳,等 (2629)
- 空心莲子草叶甲对越冬保护的响应与控害效能..... 刘雨芳,王秀秀,李 菲,等 (2638)
- ### 种群、群落和生态系统
- 气候变化对鄱阳湖白鹤越冬种群数量变化的影响..... 李言阔,钱法文,单继红,等 (2645)
- 不同退耕年限下菜子湖湿地土壤磷素组分特征变化..... 刘文静,张平究,董国政,等 (2654)

查干湖湿地浮游植物与环境因子关系的多元分析	李然然,章光新,张 蕾 (2663)
闽江河口区淡水和半咸水潮汐沼泽湿地土壤产甲烷菌多样性	曾志华,杨民和,余晨兴,等 (2674)
环境及遗传背景对延河流域植物叶片和细根功能性状变异的影响	郑 颖,温仲明,宋 光,等 (2682)
衡阳紫色土丘陵坡地植被恢复阶段土壤特性的演变	杨 宁,邹冬生,杨满元,等 (2693)
海平面上升影响下广西钦州湾红树林脆弱性评价	李莎莎,孟宪伟,葛振鸣,等 (2702)
中国南方 3 种主要人工林生物量和生产力的动态变化	杜 虎,曾馥平,王克林,等 (2712)
杉木人工林土壤真菌遗传多样性	何苑曦,周国英,王圣洁,等 (2725)
科尔沁固定沙地植被特征对降雨变化的响应	张腊梅,刘新平,赵学勇,等 (2737)
黄土丘陵区退耕还林地刺槐人工林碳储量及分配规律	申家朋,张文辉 (2746)

景观、区域和全球生态

南亚热带森林演替过程中小气候的改变及对气候变化的响应	刘效东,周国逸,陈修治,等 (2755)
黄淮海平原典型站点冬小麦生育阶段的干旱特征及气候趋势的影响	徐建文,居 辉,刘 勤,等 (2765)

资源与产业生态

基于 GIS 的山西省矿产资源规划环境影响评价	刘 伟,杜培军,李永峰 (2775)
基于效益分摊的水电水足迹计算方法——以密云水库为例	赵丹丹,刘俊国,赵 旭 (2787)

学术信息与动态

全球土地计划第二次开放科学大会 (GLP 2 nd Open Science Meeting) 会议述评	段宝玲,卜玉山 (2796)
---	----------------

期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 348 * zh * P * ¥ 90.00 * 1510 * 36 * 2014-05



封面图说: 鄱阳湖越冬的白鹤群——白鹤为国家一级保护动物,世界上白鹤东部种群的迁徙路线是从俄罗斯西伯利亚的雅库特,向南迁飞 5100km 到中国长江下游的鄱阳湖越冬,其中途经俄罗斯的雅纳河、印迪吉尔卡河和科雷马河流域,进入中国后主要停歇地有扎龙、林甸、莫莫格以及双台河口、滦河口、黄河三角洲和升金湖等地。多年的监测表明,世界 90% 以上的白鹤种群都在鄱阳湖越冬。越冬初期和末期是白鹤补充能量的关键阶段,因此,研究鄱阳湖国家级自然保护区越冬白鹤种群数量和当地气候变化的相关性具有重要意义。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201212171808

杨志宏, 吴庆明, 杨渺, 邹红菲.[树]麻雀羽再生的能量预算和水代谢散热调节.生态学报, 2014, 34(10): 2617-2628.

Yang Z H, Wu Q M, Yang M, Zou H F. The energy budget and water metabolism heat regulation of tree sparrows *Passer montanus* of toba compensatory regeneration. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(10): 2617-2628.

[树]麻雀羽再生的能量预算和水代谢散热调节

杨志宏^{1, 2}, 吴庆明¹, 杨 渺¹, 邹红菲^{1, *}

(1. 东北林业大学野生动物资源学院, 哈尔滨 150040; 2. 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[树]麻雀的羽再生能力、能量预算对策和有效的散热调节方式,对3组(对照CF、去飞羽FF和去尾羽组TF)[树]麻雀(*Passer montanus*)进行4周驯养(Acclimation)。结果发现:[树]麻雀具有较强的羽再生能力和飞羽参与个体保温。羽再生[树]麻雀能量收支水平降低极显著($P < 0.001$),FF组和TF组比CF组减少依次为:摄入能19.77%和7.17%、消化能18.79%和6.47%、同化能18.73%和6.46%、粪能28.66%和13.35%、水代谢散热热能26.95%和7.43%、排泄次数33.71%和14.40%,增加依次为:消化率1.23%和0.78%、同化率1.35%和0.84%。个体能值水平,体重CF、TF和FF组($P < 0.05$)依次降低,体温组间变化不显著($P > 0.05$)。体内能量储备,血糖、肌糖原、体脂和水分含量组间差异不显著($P > 0.05$),肝糖原含量、体脂重组间差异显著($P < 0.05$)。器官水平包括心脏、肾脏、腺胃、小肠、盲肠和总消化道长度及质量出现积极的响应。日代谢水量组间差异极显著($P < 0.001$)。组间日排泄次数最少平均为56.11次和最多可达96.34次/只。结果表明:羽再生[树]麻雀分别选择了不同程度的降低能量收支水平,提高摄入食物的消化、吸收效率,动用体内能量储备来获取摄入能量不足部分,降低器官总能耗的能量预算对策和不同的新羽(再生羽枚数:飞羽部分和尾羽全部)再生的能量投资对策。泄殖腔排出(粪尿混合物)水是鸟类特有的、迅速的和有效的散热调节方式。

关键词:[树]麻雀;羽再生;能量预算;水代谢;散热调节

The energy budget and water metabolism heat regulation of tree sparrows *Passer montanus* of toba compensatory regeneration

YANG Zhihong^{1, 2}, WU Qingming¹, YANG Miao¹, ZOU Hongfei^{1, *}

1 College of Wildlife Resources, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

2 College of Life Science, Agriculture and Forestry, Qiqihaer University, Qiqihaer 161006, China

Abstract: We compared differences in feather regeneration ability, energy budgets, organs levels, and heat regulation in molting Tree sparrows (*Passer montanus*). After one week of adaptation to laboratory conditions, thirty adult birds were assigned to three groups including control (CF, $n = 10$), remove flight feathers (FF, $n = 10$) and remove tail feathers (TF, $n = 10$) by body mass and SPSS Tools. All three groups were monitored over a four-week period while exposed to similar environmental conditions. On a daily basis we measured food and water intake, the numbers of defecations, fecal mass, and so on. Feathers had strong regenerative capacities, and flight feathers were also important in heat regulation. The level of energy budget of birds declined ($P < 0.001$). FF and TF groups declined 19.77% and 7.17% in energy intake, 18.79% and 6.47% in digestible energy, 18.73% and 6.46% in assimilation energy, 28.66% and 13.35% in fecal energy, 26.95% and 7.43% in cooling heat energy of water metabolism, 33.71% and 14.40% in discharge frequency. FF and TF groups showed increases of 1.23% and 0.78% in digestion rate, and 1.35% and 0.84% in assimilation rate, respectively, compared with the CF group. Body weight in CF, TF and FF ($P < 0.05$) declined but body temperature showed no obvious

基金项目:中央高校基本科研业务费(DL12EA04);国家自然科学基金(31070345, 30670350)

收稿日期:2012-12-17; 网络出版日期:2014-02-20

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hongfeizou@163.com

change ($P>0.05$). In terms of energy reserves, including blood sugar, muscle glycogen, body fat and water content, no significant difference ($P>0.05$) was observed between the three groups, but liver glycogen content and body fat mass did differ ($P<0.05$). Organ level, including heart, kidney, glandular stomach, small intestine, caecum and the length and quality of the total gastrointestinal tract showed a response to feather loss. Groups differed significantly in average daily water metabolism ($P<0.001$). The minimum and maximum average number of defecations reached 56.11 times and 96.34 times, respectively.

Under low levels of environmental stress, *P. montanus* showed strong feather regeneration capacities. The differences between regenerating flight feathers and tail feathers is due to distinct energy investment strategies and energy-saving strategies, also including energy consumption in flight and energy saving strategy of water metabolism heat loss reduction. There was an obvious decline in the level of energy budget and energy reserve of *P. montanus*. Discharge water from the cloacae with feces and urine mixture is a peculiar, effective and rapid thermal loss regulation mode among birds. Different feather parts have an influence on individual insulation capability and movement capacity, which proves to be a main reason for differences in water metabolism heat dissipation. Birds regenerating feathers showed reduced organs mass, improved organ efficiency, and reduced energy expenditure by organs. Energy consumption of organs is an integral part of individual energy budgets. Organ functional capabilities are closely related to individual energy intake, transfer and storage. Changes in organ quality, functional capabilities and energy consumption are the organ-level responses to body energy budget strategies. Distinct energy budget strategies were adopted by *P. montanus* in the same living environment with three feather structures.

Key Words: *Passer montanus*; feather regeneration; energy budget; water metabolism; heat loss regulation

动物的能量预算对策和调节能力是物种适合度(生存和繁殖)的决定因素,其能量收支、利用效率和调节机理是生态生理学研究的核心问题^[1]。关于动物产热、保温和散热一直都是生态生理学家和进化生理学家关注的焦点。鸟类能够依据自身状态^[2]和选择最适的能量收支对策来应对生境变化^[3],其生理和行为所表现出的适应性调节与其能量预算密切相关^[4-5]。

恒温(40—42 °C)是鸟类躯体结构和功能全面进化的产物,并使其成为脊椎动物中靠近浪费对策端的物种。恒温可以给内温性动物带来潜在收益,如使酶特化^[6]和酶系统更为有效^[7]。然而恒温取决于产热、保温和有效散热,其中产热是获得高体温的生理基础,保温是维持高体温的关键,精确散热是保持体温恒定的必要条件。鸟类高体温意味着高的产热能耗^[8]。在静止时,恒温动物基础代谢产热主要来自于内脏器官,从广义上讲还包括脑,而不是肌肉^[9]。“中心限制假说”和“外周限制假说”认为,基础能耗既受到中心效应器官的限制,又与外周器官相关联^[10]。鸟类可以通过调节羽毛与身体角度以及增减体羽的方式来改变保温效果。“贝格曼定律(Bergman's rule)”认为大型恒温动物身体单位体重

(或单位体积)所散失的热量小于小型恒温动物,然而这并不能等同于大型恒温动物身体所散失的热量少于小型恒温动物。“艾伦定律(Allen's rule)”认为恒温动物身体的突出部分在低温环境中会有变小变短的趋势,这是减少散热的一种形态适应。小型鸟类对外界环境变化较为敏感,易受环境变化的影响^[11]。鸟类飞行或逃避天敌等过程中都将迅速产生大量的热,为避免体温升高对机体内部造成损伤,就必然有其快速的、有效的和精确的散热调节机制。体表覆羽、无汗腺的进化特点意味着鸟类无法通过汗液蒸发的散热方式来进行体温调节。那么,鸟类降温的调节方式是什么?又是如何进行快速、有效的散热调节来保持体温相对恒定?

动物的体重是动物生理学、形态学和行为学等研究的重要参数^[12],可以反映出其营养状态受环境影响进行的适应性调节^[13];体脂储备是一种重要的生存对策,对于缓解生存压力增大意义重大^[14-15];体温是反映个体与环境之间能量收支的重要参数,也是产热和散热动态平衡的最终结果。表型可塑性(phenotypic plasticity)是指同一个基因型对不同环境的应答而产生不同的表型特性。从进化生物学角度讲,器官的功能应与机体对该器官的要求相适

应^[16-17]。Vezina 和 Williams^[18]认为表型可塑的适应性变化程度与动物生存能力密切相关。

[树]麻雀 (*Passer montanus*) 为留鸟, 是一种常见的杂食性雀形目鸟类^[19]。已发现[树]麻雀具有较高的基础代谢率(BMR)和热传导, 相对较宽的热中性区(TNZ)和较低的下临界温度, 冬季获得全年最高的体内能量储备^[20], 其器官具有灵活的表型可塑性^[4]。迁徙鸟和留鸟是鸟的不同类群经过长期进化后对其生存环境变化作出的两种选择, 即逃离和适应。至今, 关于迁徙鸟类迁徙过程中能量变化方面已经进行了大量的研究。其中, 换羽期鸟类或迁徙时期同时换羽鸟类(如芦莺 *Acrocephalus scirpaceus*)的研究中都发现其能量积累速度显著下降。然而, 鸟类迁徙过程中, 环境变化、禁食或食物限制、食物种类的改变、中途停歇、面临被捕食和攻击等很多不确定因素都会对其能量收支产生影响。同时, 鸟类迁徙途中并且换羽时的能量收支变化至少应为迁徙和换羽交互作用的结果。目前, 相关的大量研究多集中于迁徙鸟类和野外实验。所以, 本文以中国北方地区留鸟[树]麻雀为研究对象, 于相同实验室环境中, 通过对去羽(飞羽、尾羽)和对照 3 组[树]麻雀的个体能量收支、能值变化和器官响应 3 个水平的比较, 来探讨小型鸟类(留鸟)的羽再生能力、能量预算对策和有效的散热调节方式。

1 材料与方法

1.1 实验动物

2011 年 12 月在黑龙江省齐齐哈尔市(47°29'N, 124°02'E)用雾网诱捕[树]麻雀 40 只, 并将这些个体在东北林业大学野生动物保护医学与生态安全研究中心饲养。为减少人为干扰, 适应及实验的全过程均由本文第一作者独立完成, 每日除检查和添加食物、更换饮水和粪盒外尽量减少与其接触的时间。经过 7 d 相同环境和食物(带壳谷子)的适应后, 选成年健康[树]麻雀 30 只, 逐一称重和标记。之后采用 SPSS13.0 软件按体重分为 3 组(10 只/组): 对照组(CF)、去飞羽组(FF)和去尾羽组(TF), 组间体重差异不显著($F_{(2,27)} = 0.909$, $df = 29$, $P = 0.424 > 0.05$)。分组驯养 28 d, 饲养环境相同(长 90 cm×宽 50 cm×高 60 cm 的内置栖架、食盒和饮水器的铁丝笼), 并保证谷子和饮用水的每日足量供给。

[树]麻雀共有初级飞羽 18 枚(双侧)和尾羽 12 枚(全部), 拔除飞羽组双侧初级飞羽共 10 枚(5 枚/侧; 由外至内)和尾羽组 12 枚尾羽, 去除羽总质量分别为: (0.110 ± 0.002) 和 (0.113 ± 0.004) g ($t = -0.707$, $df = 18$, $P = 0.496 > 0.05$); 笼内, 与对照组相比, 去羽的两实验组[树]麻雀旋转飞行行为停止, 但其觅食、定向飞行和跳跃行为没有明显不同, 实验开始。羽再生的 3 个时期分别为: I 期, 为补偿再生期, 从羽毛去除至新羽初现; II 期, 为快速生长期, 是新生羽长至或接近原旧羽羽长的时间; III 期, 为羽翼丰满期, 是快速生长期结束至实验结束的时间。

1.2 体重、体温、体脂、血糖和糖原(肝脏和肌肉)测量

体重用电子天平(BS210 型, 深圳)测量(测量时软网束缚和读数精确到 0.01 g)。用电子体温计插入泄殖腔约 1 cm 测量体核温度, 每次测温探头在泄殖腔内静置约 20 s 和数值稳定时读数(精确到 0.10 °C)。每隔 2 d 测定全部体温 1 次, 共测体温 10 次。体脂含量的测定采用索氏抽提法测定^[4]。用电子血糖计测量血糖。蒽酮比色法测定糖原含量。

1.3 能量收支

投喂食物、自动饮水机换水、收集剩余食物及粪便均在每天 10:00—11:00, 手工分离剩余谷子、谷壳和粪便。采用粪便痕迹计数法计数排泄次数, 即每日定时计数笼子下部铺放的垫纸上全部的粪便痕迹(可增加更换垫纸次数和累加计数)。本文依据适应期间[树]麻雀粪便排泄次数的估测, 每日换取粪盒 4 次, 时间间隔设定分别为: 7:00、10:00、13:00 和 16:00。累计计数结束, 将粪便连同垫纸一同置于 60 °C 干燥箱干燥至恒重, 以其干重减去垫纸初重值记为粪便干重(精确到 0.01 g)。用氧弹热量计(GR-3500 型, 广东)测定热值。以每日早、中和晚测定的同环境和同容器中的 3 次水温的平均值记为当日的环境水温(环境水温的变化迟于环境温度)。以测定的各组当天平均每只[树]麻雀的代谢能值(总代谢能值/样本数)为各组当天数据, 记为 1 次, 共测定数据 28 次(1 次/d)。能量收支^[4]的公式调整和水代谢热能散失计算根据下列公式:

$$\begin{aligned} \text{干物质质量(g)} &= \text{物质质量(g)} - \text{物质中水质量(g)} \\ \text{摄食量(g/d)} &= \text{投食量(g/d)} - \text{剩余食物量(g/d)} \\ \text{摄入能(kJ/d)} &= \text{摄入干谷子质量(g/d)} \times \text{谷子热值} \end{aligned}$$

$(\text{kJ/g}) - \text{谷壳(干)质量(g)} \times \text{谷壳热值(kJ/g)}$
 粪能(kJ/d) = 粪便干质量(g/d) \times 粪便热值(kJ/g)
 摄入量(g/d) \approx 代谢水量(g/d) = 自动饮水器和水
 (初重-末重)(g/d) + 摄入食物中水质量(g/d)
 水代谢散热热能(kJ/d) = 水的比热值(J/g $^{\circ}\text{C}$) \times 摄水
 量(g) \times (鸟的体温-环境水温)($^{\circ}\text{C}$) $\times 10^{-3}$
 消化能(kJ/d) = 摄入量(kJ/d) - 粪能(kJ/d)
 同化能(kJ/d) = 消化能(kJ/d) - 水代谢散热热能
 (kJ/d)

消化率(%) = 消化能(kJ/d) / 摄入量(kJ/d) $\times 100\%$

同化率(%) = 同化能(kJ/d) / 摄入量(kJ/d) $\times 100\%$

1.4 器官解剖、器官重量和消化器官长度

动物称重和实验结束后断颈动脉处死(用电子血糖计测量血糖)、解剖。先取出完整的消化道,去除结缔组织和脂肪,分离出腺胃、肌胃、小肠(包含十二指肠、空肠和回肠)、直肠和盲肠;各部分平展为自然状态下最大长度(不拉伸),用游标卡尺($\pm 1 \text{ mm}$)测量长度。用眼科手术专用剪刀将消化道各器官纵剖开,生理盐水清洗去除内容物,用滤纸吸干残留的生理盐水。再取出脑、心脏、肝脏、肺、肾脏和消化道各器官,用 BS210 型电子天平($\pm 0.1 \text{ mg}$)称量鲜重。将称量鲜重后的各器官置于 60°C 鼓风干燥箱内烘干至恒重,称量和记录各器官干重。总消化道的各指标均为腺胃、肌胃、小肠和直肠的相加值。

1.5 统计分析

采用 SPSS13.0 进行数据统计分析。组内实验前后体重和体温的比较采用配对样本(自身配对) t -检验(Paired-Samples T Test)。组间数据(消化率和同化率是其百分数的平方根反正弦转换值)比较均采用单因子方差分析(One-way ANOVA)和 Dunnett- t 进行比较。结果以平均值 \pm 标准误(Mean \pm SE)表示, $P < 0.05$ 为差异显著, $P < 0.01$ 为差异极显著。

2 结果

2.1 能量预算

2.1.1 [树]麻雀组间 28d 的能量预算

FF 组和 TF 组[树]麻雀分别采取减少能量收支和提高能量摄入效率的能量预算对策。摄食量、摄入量、粪能、水代谢散热热能、排泄次数、消化能、同化能、消化率和同化率组间差异均极显著($F_{(2,81)} = 41.223, P = 0.000; F_{(2,81)} = 33.256, P =$

$0.000; F_{(2,81)} = 40.181, P = 0.000; F_{(2,81)} = 102.203, P = 0.000; F_{(2,81)} = 33.299, P = 0.000; F_{(2,81)} = 76.245, P = 0.000; F_{(2,81)} = 33.845, P = 0.000; F_{(2,81)} = 33.553, P = 0.000; F_{(2,81)} = 22.845, P = 0.000; F_{(2,81)} = 25.080, P = 0.000)$ 。FF 组和 TF 组比 CF 组分别减少依次为:摄食量 19.81% ($P = 0.000$) 和 7.57% ($P = 0.000$)、摄入量 26.57% ($P = 0.000$) 和 5.50% ($P = 0.115$)、粪能 28.66% ($P = 0.000$) 和 13.35% ($P = 0.000$)、水代谢散热热能 26.95% ($P = 0.000$) 和 7.43% ($P = 0.031$)、排泄次数 33.71% ($P = 0.000$) 和 14.40% ($P = 0.000$)、消化能 18.79% ($P = 0.000$) 和 6.47% ($P = 0.007$)、同化能 18.73% ($P = 0.000$) 和 6.46% ($P = 0.007$)。FF 组和 TF 组比 CF 组增加依次为:消化率 1.23% ($P = 0.000$) 和 0.78% ($P = 0.000$)、同化率 1.35% ($P = 0.000$) 和 0.84% ($P = 0.000$) (图 1)。

2.1.2 I、II 和 III 期[树]麻雀组间能量预算比较

I 补偿再生期(1—7 d) FF 和 TF 组比 CF 组,[树]麻雀的摄食量和摄入量减少,其能量收支因此随之减少。FF 组能量收支的降低幅度和消化率、同化率均大于 TF 组。摄入量、粪能、水代谢散热热能和排泄次数组间差异显著($F_{(2,18)} = 2.723, P = 0.037; F_{(2,18)} = 12.551, P = 0.000; F_{(2,18)} = 4.358, P = 0.029; F_{(2,18)} = 11.612, P = 0.001$), CF 组、TF 组和 FF 组均依次降低。消化能和同化能组间差异不显著($F_{(2,18)} = 2.218, P = 0.148; F_{(2,18)} = 2.101, P = 0.151$)。消化率和同化率组间差异显著($F_{(2,18)} = 9.292, P = 0.002; F_{(2,18)} = 9.012, P = 0.002$), CF 组、TF 组和 FF 组依次升高(图 2)。

II 快速生长期(8—14 d) FF 组的能量收支仍显著低于 CF 组,TF 组的能量收支水平接近 CF 组。摄入量、水代谢散热热能、排泄次数、消化能、同化能和粪能组间差异显著($F_{(2,18)} = 7.472, P = 0.004; F_{(2,18)} = 16.786, P = 0.000; F_{(2,18)} = 12.246, P = 0.000; F_{(2,18)} = 5.956, P = 0.010; F_{(2,18)} = 5.808, P = 0.011; F_{(2,18)} = 21.495, P = 0.000$), CF 组、TF 组和 FF 组均依次递减。消化率和同化率组间差异极显著($F_{(2,18)} = 10.115, P = 0.001; F_{(2,18)} = 12.111, P = 0.000$), CF 组、TF 组和 FF 组依次升高(图 2)。

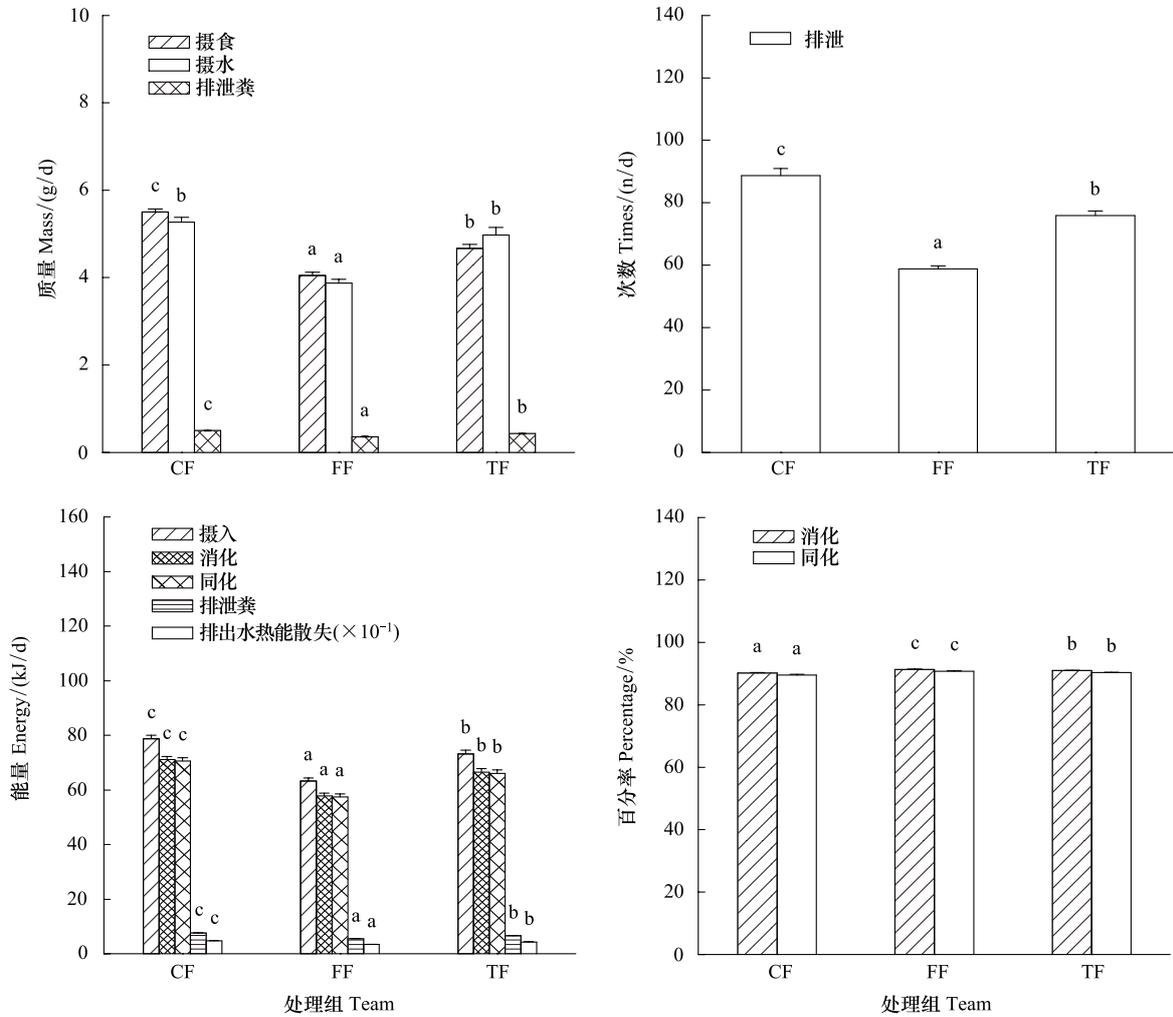
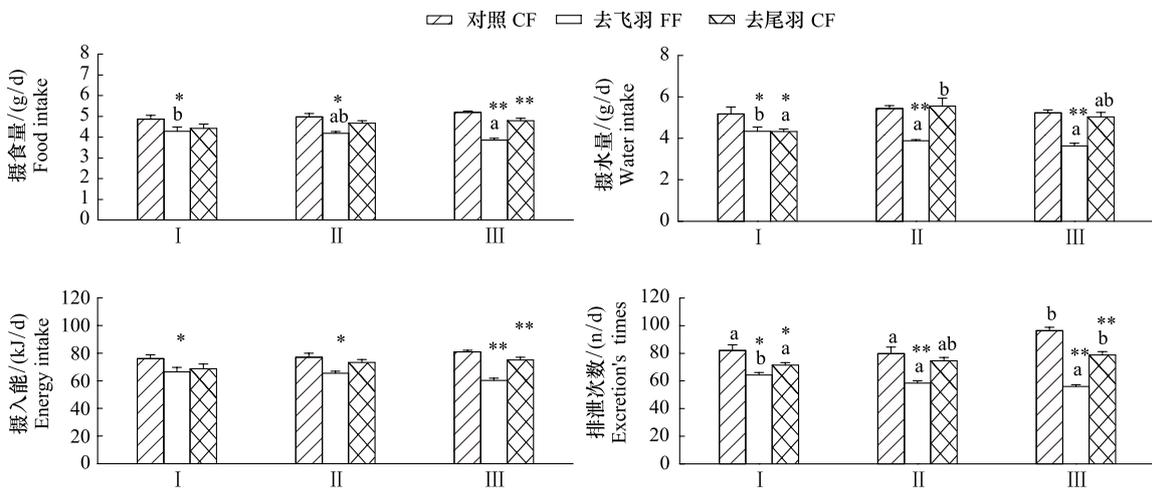


图1 [树]麻雀羽再生对能量预算的影响

Fig.1 Effects of toba compensatory regeneration on energy budget of Tree Sparrows

图中 a,b,c 不同字母代表各组组间比较从小到大和差异显著; CF:对照组 Control Feather; FF:去飞羽组 Remove Flight Feather; TF:去尾羽组 Remove Tail Feather



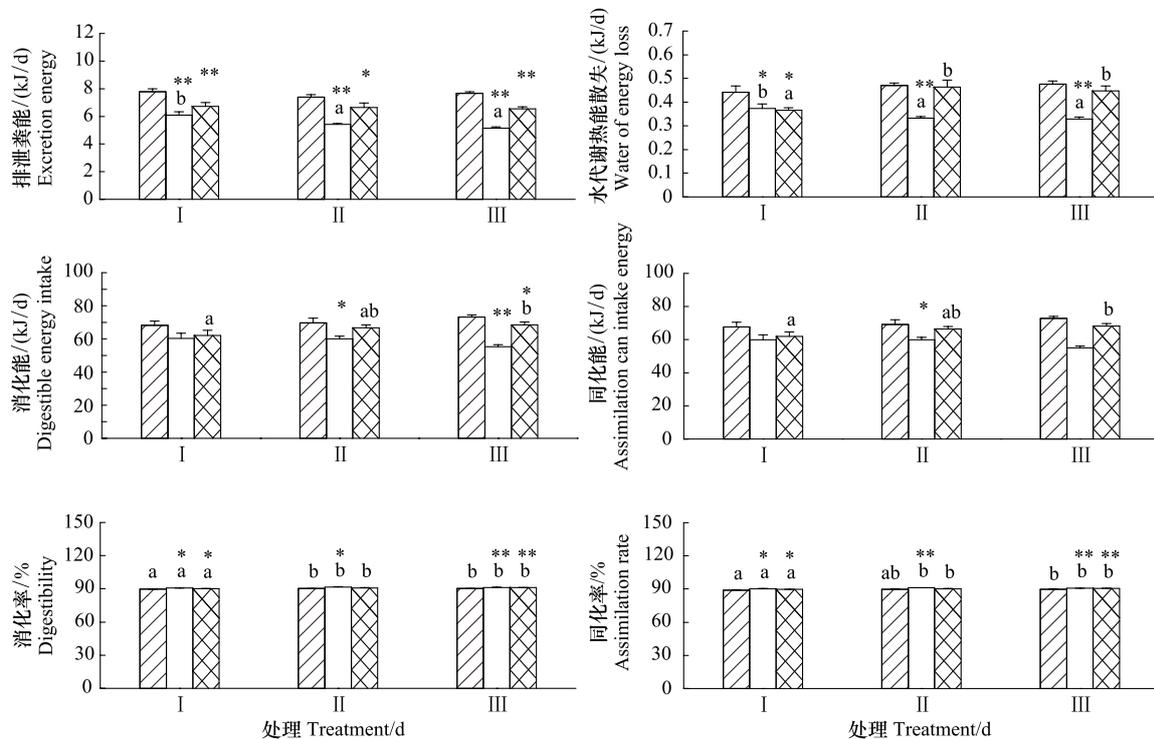


图2 [树]麻雀各组间不同时期能量预算比较

Fig.2 Comparison of energy budget in different period among three groups of Tree Sparrow

图中 a, b, c 不同字母代表各小组内 3 个时期 (I、II 和 III) 比较从小到大和差异显著; * 或 ** 分别代表各时期组间实验组与对照组相比差异显著或极显著

III 羽翼丰满期 (15—28 d) CF 组能量收支水平升高, 并显著高于 FF 组和 TF 组; TF 组水代谢热能散失 (支出) 增加和接近 CF 组。摄入能、粪能、排泄次数、消化能和同化能组间差异均极显著 ($F_{(2,39)} = 50.672, P = 0.000; F_{(2,39)} = 102.871, P = 0.000; F_{(2,39)} = 95.932, P = 0.000; F_{(2,39)} = 44.461, P = 0.000; F_{(2,39)} = 44.471, P = 0.000$)。CF 组、TF 组和 FF 组均依次降低。水代谢散热能组间差异极显著 ($F_{(2,39)} = 25.747, P = 0.000$); CF 组、FF 组和 TF 组依次降低。消化率和同化率组间差异极显著 ($F_{(2,39)} = 14.525, P = 0.000; F_{(2,39)} = 14.193, P = 0.000$), CF 组、TF 组和 FF 组依次升高 (图 2)。

2.1.3 [树]麻雀组内 I、II 和 III 期能量预算变化

对照组 (CF 组) CF 组适应环境, 能量收支水平和排泄次数递增, 能量摄入效率升高。I 至 III 期摄入能、粪能、水代谢热能、消化能和同化能期间差异不显著 ($F_{(2,25)} = 1.837, P = 0.180; F_{(2,25)} = 1.278, P = 0.296; F_{(2,25)} = 0.996, P = 0.383; F_{(2,25)} = 2.067, P = 0.148; F_{(2,25)} = 2.064, P = 0.148$); 排泄次数、消化率和同化率期间均为递增趋势 ($F_{(2,25)} = 8.299,$

$P = 0.002; F_{(2,25)} = 6.288, P = 0.006; F_{(2,25)} = 3.390, P = 0.050$), III 期均递增至最大 (图 2)。

去飞羽组 (FF 组) FF 组能量收支水平和排泄次数递减, 能量摄入效率升高。I 至 III 期摄入能、粪能、水代谢散热能、排泄次数、消化能和同化能期间均为递减趋势 ($F_{(2,25)} = 3.189, P = 0.058; F_{(2,25)} = 10.544, P = 0.000; F_{(2,25)} = 3.766, P = 0.037; F_{(2,25)} = 7.363, P = 0.003; F_{(2,25)} = 2.803, P = 0.080; F_{(2,25)} = 2.794, P = 0.080$), III 期均减至最小; 消化率和同化率期间均为递增趋势 ($F_{(2,25)} = 4.975, P = 0.015; F_{(2,25)} = 5.388, P = 0.011$), II 期增至最大 (图 2)。

去尾羽组 (TF 组) TF 组能量收支水平和排泄次数递增, 能量摄入效率升高。I 至 III 期摄入能、排泄次数、消化能、同化能、消化率和同化率期间均为递增趋势 ($F_{(2,25)} = 1.858, P = 0.177; F_{(2,25)} = 2.299, P = 0.121; F_{(2,25)} = 2.303, P = 0.121; F_{(2,25)} = 2.266, P = 0.125; F_{(2,25)} = 10.676, P = 0.000; F_{(2,25)} = 10.135, P = 0.001$), III 期均增至最大; 粪能期间为递减趋势 ($F_{(2,25)} = 0.191, P = 0.828$), III 期减至最

小;水代谢热能散失期间为递增趋势($F_{(2,25)} = 4.164, P=0.027$), II 期增至最大(图 2)。

2.2 [树]麻雀个体能值和体内能量储备组间比较

体重组间差异显著($F_{(2,27)} = 3.510, P=0.025$), CF 组、TF 组和 FF 组依次降低。驯养前后组内体重变化: CF 组变化不显著($t = 0.998, df = 9, P=0.348$)、FF 组和 TF 组体重比驯养前降低显著($t = 3.540, df = 9, P=0.006; t = 2.660, df = 9, P=0.029$)。胴体干重组间差异显著($F_{(2,27)} = 2.764, P=0.044$), FF 组、TF 组和 CF 组依次升高。体温组间差异不显著($F_{(2,297)} = 0.682, P=0.436$) (图 3)。

血糖含量组间比较差异不显著($F_{(2,27)} = 0.405, P=0.677$),表明它们的能量供应能力基本相同。肝糖原含量组间差异显著($F_{(2,27)} = 4.495, P=0.011$), TF 组、FF 组和 CF 组依次升高。肌糖原含量组间差异不显著($F_{(2,27)} = 0.018, P=0.782$),可能与受限的生存空间有关。体脂质量组间差异显著($F_{(2,27)} = 2.924, P=0.037$),但体脂含量和水分含量组间差异不显著($F_{(2,27)} = 0.820, P=0.052; F_{(2,27)} = 0.793, P=0.063$)。体脂含量 CF 组 > TF 组 > FF 组,水分含量 TF 组 > FF 组 > CF 组(图 3)。

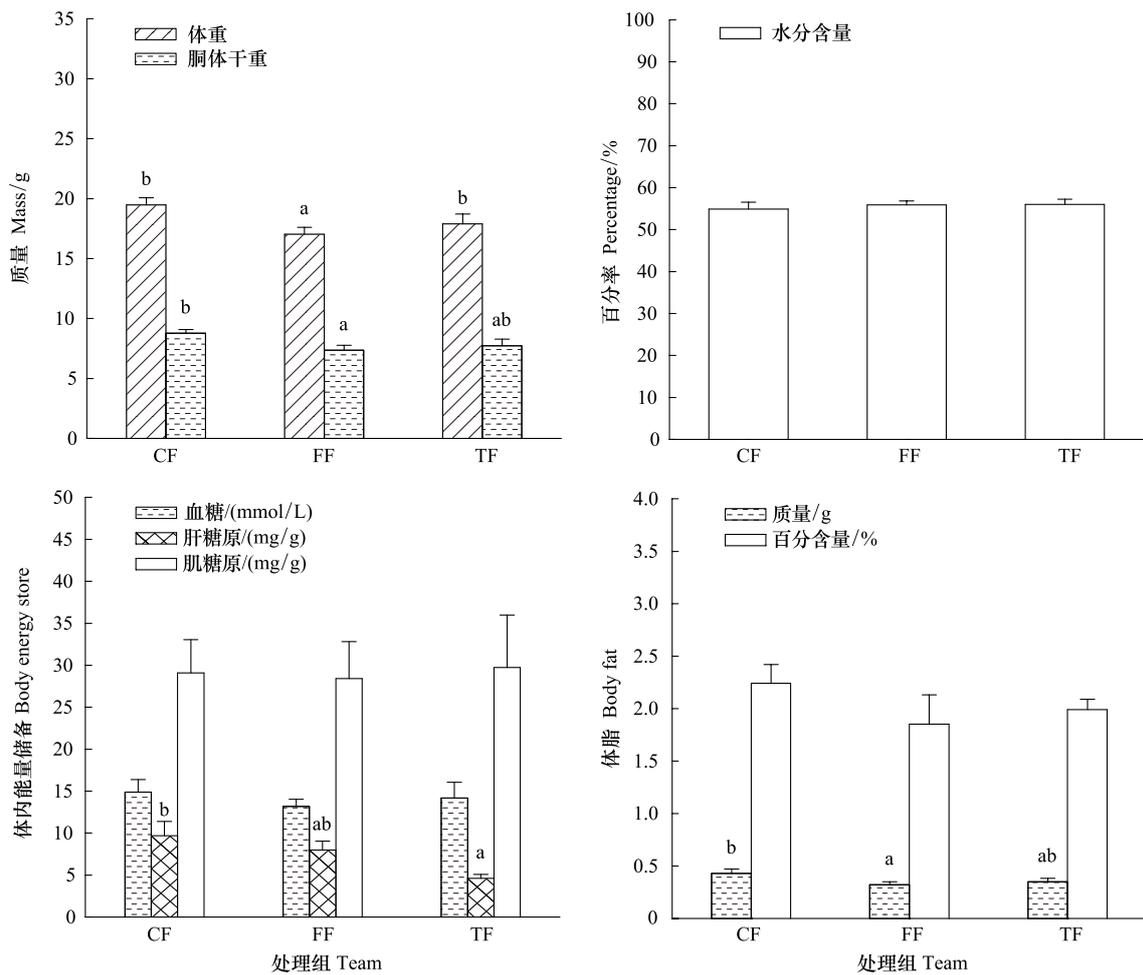


图 3 [树]麻雀各组间体质量、水分含量、能量储备和体脂的比较

Fig.3 Comparison of body mass, water, energy storage and body fat among different groups of Tree Sparrow

图 a, b, c 不同字母代表各组组间比较从小到和差异显著; CF: 对照组 Control Feather; FF: 去飞羽组 Remove Flight Feather; TF: 去尾羽组 Remove Tail Feather

2.3 [树]麻雀器官形态特征组间表型可塑性变化

2.3.1 能量摄入器官长度和质量组间比较

腺胃鲜重和干重、肌胃长度、小肠鲜重和干重、

总消化道长度和干重组间差异显著($F_{(2,27)} = 16.946, P=0.001; F_{(2,27)} = 11.923, P=0.002; F_{(2,27)} = 5.496, P=0.025; F_{(2,27)} = 6.801, P=0.014; F_{(2,27)} = 6.487,$

$P=0.016$; $F_{(2,27)}=5.718$, $P=0.022$; $F_{(2,27)}=7.636$, $P=0.010$); 腺胃长、小肠长度、肌胃鲜重和干重、直肠长、鲜重和干重和总消化道鲜重组间差异不显著 ($F_{(2,27)}=2.105$, $P=0.173$; $F_{(2,27)}=3.162$, $P=0.086$; $F_{(2,27)}=1.153$, $P=0.354$; $F_{(2,27)}=2.178$, $P=0.164$; $F_{(2,27)}=2.372$, $P=0.143$; $F_{(2,27)}=1.111$, $P=0.367$; $F_{(2,27)}=0.231$, $P=0.798$; $F_{(2,27)}=2.569$, $P=0.126$) (表 1)。

2.3.2 能量转化器官及其他能耗器官质量组间比较

心脏鲜重和干重组间差异显著 ($F_{(2,27)}=5.457$, $P=0.025$; $F_{(2,27)}=8.455$, $P=0.007$), CF 组 > TF 组 > FF 组。肾脏干重组间差异显著 ($F_{(2,27)}=7.434$, $P=0.011$), TF 组 > FF 组 > CF 组。脑、肺脏、肝脏的鲜重和干重、肾脏鲜重组间差异不显著 ($F_{(2,27)}=2.573$, $P=0.125$; $F_{(2,27)}=1.513$, $P=0.267$; $F_{(2,27)}=0.170$, $P=0.846$; $F_{(2,27)}=0.150$, $P=0.863$; $F_{(2,27)}=0.570$, $P=0.583$; $F_{(2,27)}=0.430$, $P=0.581$; $F_{(2,27)}=2.203$, $P=0.161$) (表 1)。

表 1 [树]麻雀个体器官水平组间比较 (Mean±SE)

Table 1 Comparison of individual organ levels among different groups of Tree Sparrow

项目 Item	对照组	去飞羽组	去尾羽组	P
	Control feather	Remove flight feather	Remove tail feather	
样本数 Sample size	10	10	10	
脑组织鲜重 Weight of brain/mg	731.75±28.58	659.80±24.26	667.75±17.99	ns
脑组织干重 Dry weight of brain/mg	176.25±8.98	158.20±6.20	162.75±7.98	ns
心脏组织鲜重 Weight of heart/mg	299.25±11.08 b	242.40±14.82 a	279.75±9.50 b	*
心脏组织干重 Dry weight of heart/mg	82.75±2.75 b	61.80±3.89 a	73.25±3.99 b	**
肝脏组织鲜重 Weight of liver/mg	598.75±30.99	546.40±24.56	569.50±49.86	ns
肝脏组织干重 Dry weight of liver/mg	214.11±10.01	195.39±5.57	200.92±7.09	ns
肺脏组织鲜重 Weight of lung/mg	213.25±37.33	199.20±13.83	215.75±8.98	ns
肺脏组织干重 Dry weight of lung/mg	52.00±9.23	47.60±3.50	49.00±4.06	ns
肾脏组织鲜重 Weight of kidney/mg	57.75±10.78	58.80±4.18	75.00±0.82	ns
肾脏组织干重 Dry weight of kidney/mg	14.25±1.38 a	16.00±1.22 a	21.00±1.08 b	*
腺胃长度 Glandular stomach length/mm	7.72±0.58	6.21±0.19	6.25±0.90	ns
腺胃组织鲜重 Weight of glandular stomach/mg	42.00±2.61 b	28.00±1.38 a	25.00±2.55 a	**
腺胃组织干重 Dry weight of glandular stomach/mg	12.75±1.80 b	7.00±0.32 a	6.25±0.48 a	**
肌胃长度 Muscular stomach length/mm	12.61±0.35 b	11.24±0.38 a	10.64±0.51 a	*
肌胃组织鲜重 Weight of muscular stomach/mg	464.50±20.59	440.00±24.75	416.75±14.26	ns
肌胃组织干重 Dry weight of muscular stomach/mg	164.00±11.87	141.40±9.74	135.50±7.27	ns
小肠长 Small intestine length/mm	137.63±2.11 b	133.62±5.08 ab	124.36±1.35 a	ns
小肠组织鲜重 Weight of small intestine/mg	702.75±65.07 b	557.80±27.40 a	494.00±12.81 a	*
小肠组织干重 Dry weight of intestine/mg	228.25±27.16 b	164.40±7.52 a	152.00±6.75 a	*
直肠长 Rectum length/mm	11.60±0.75	9.04±1.39	12.34±1.01	ns
直肠组织鲜重 Weight of rectum/mg	50.00±3.63	52.00±4.25	44.00±3.54	ns
直肠组织干重 Dry weight of rectum/mg	13.25±0.75	13.00±1.14	12.25±1.11	ns
总消化道长 Total digestive tract length/mm	169.42±2.28 b	160.14±4.12 ab	153.58±1.87 a	*
总消化道组织鲜重 Weight of total digestive tract/mg	1259.25±59.77	1077.80±54.56	1069.75±82.87	ns
总消化道组织干重 Dry weight of total digestive tract/mg	418.25±30.32 b	325.80±17.86 a	306.00±12.06 a	**

a, b, c 不同字母代表组间比较从小到大的差异显著; * 或 ** 分别代表组间差异显著或极显著, ns 为不显著

2.4 行为、排泄物、羽再生和生理解剖观察结果

行为差异 觅食后 CF 组有往返飞行跳跃行为, FF 组和 TF 组飞行跳跃行为减少或停止, 直至 III 期开始逐渐恢复, I 和 II 期 TF 组活跃性好于 FF 组。

生存空间较小导致灵活性差别不明显。

排泄物形状有: ①圆柱形; ②锥形; ③不规则形; ④白色液体形, 含水量依次增大和干粪量减少。①和②含水量少和以粪为主, ③和④含水量多和干粪

量较少。观察发现,3组[树]麻雀的排泄物中同时存在以上4种形状,差异主要是排泄物形状③和④,即③和④的多少与其排泄次数有关。

羽再生 1—7 d (I期),羽去除部位无变化。第8天(II期),部分个体(存在个体差异)羽去除部位出现白色羽管,至第9天再生全部开始。再生新羽描述:白色羽管长至约0.2 cm 停止,继续离体方向生长的是黑色羽管,羽管(黑和白)长至约1.5 cm 时(生长约3—4 d)停止长长。离体方向,白色羽管端部长出旋转包裹的羽翼(毛笔状),羽翼生长和展开迅速,3—5 d 即可生长至原羽长。约2周羽翼丰满生长期(III期),新羽功能能力迅速恢复。TF组尾羽(12枚)基本全部再生(仅有2只生长11枚)、新羽羽枝生长迅速和均衡。FF组再生飞羽枚数不等和生长不均衡,并存在明显的个体差异。

CF组盲肠多为双侧小肠形和乳白色。FF组和TF组中一部分个体的盲肠为双侧小肠形,乳白色,长度长于CF组;另一部分为单侧盲肠端部膨大或双侧膨大呈菜花状,两侧通常大小不一,膨大处多突起,离体端颜色呈棕褐色,中部为粉红色,基部(小肠和直肠的连接处)乳白色。盲肠的质量、形态结构个体间差别较大。

3 讨论

[树]麻雀的日摄食量(谷子)约为自身体重的1/4或大于自身胴体干重的1/2,高能量收支和代谢水平是其能够维持高体温的关键(图1,图3)。

3.1 羽再生能力和不同的能量投资对策

羽生长II期仅为7 d,再生新羽的结构和功能基本恢复。在生存空间和食物可获得性受到限制和需要补偿再生羽枚数较多的前提下,新羽生长迅速。生存空间增大、食物丰富度增加和可以选择性摄入所需各种营养及微量元素的自然生境中,羽生长会更容易。再生尾羽优于飞羽,是因为羽功能缺失部位不同和受限的生存空间使它们选择了不同的能量投资对策,这也包括减少飞行能耗和水代谢热能散失的节能对策。从进化生物学角度讲,器官的功能应与机体对该器官的要求相适应^[16]。“同形态构成制约假说(symmorphosis limitation hypothesis)”认为各器官组织的能力应保持协调一致^[17,21]。原飞羽在受限的生存空间中功能过剩,再生飞羽羽枚数的投

资预算因此减少。尾羽与运动的灵活性和准确性密切相关,其功能在受限的生存空间中更为重要,因而选择尾羽羽枚数全部再生的投资预算。所以,[树]麻雀飞羽和尾羽均具有较强的再生能力。再生羽枚数和羽丰满程度主要是取决于它们为适应生存环境所选择的能量投资。

3.2 能量收支预算、体内能量储备和个体能值

个体的能量预算主要包含个体与环境之间的能量收支、体内能量储备和器官能耗增减3个方面。本文发现,羽再生[树]麻雀选择了降低能量收支水平、提高能量摄入效率、动用体内能量储备来获取摄入能量不足部分和精简器官能耗的能量预算对策。这与迁徙鸟类换羽期能量积累速度显著下降的结论相类似^[22]。它们排出的粪能占摄入能的8.27%—10.24%,均与其摄入能的变化趋势相同。CF、TF和FF组水代谢热能散失均依次显著降低($P < 0.001$),这很可能与TF和FF组减少热量散失的节能对策以及飞羽参与个体保温有关。同时,不同羽部位功能缺失的差异引起FF和TF组在能量收支水平上的极显著差异(图1)。“热耗散限制假说(heat dissipation limit hypothesis)”认为低温暴露不会改变动物的摄能需求,而是改变了散热能力^[23]。所以,本文结果很可能成为“热耗散限制假说”的重要补充。

鸟类体内的能量储备在生存压力增大时意义重大,如迁徙鸟类迁徙前的体重增加^[24]和冬季[树]麻雀全年体重最高^[20]。迁徙鸟类迁徙前增加的脂肪可以满足鸟类迁飞时期的能量需求^[25-26]。脂肪氧化产生的代谢水有利于维持鸟类在迁徙过程中的水分平衡^[27]。Van和Lindstrom^[28]认为携带脂肪增加会降低鸟类的飞行速度,被捕食的机率增大。迁徙途中换羽鸟类的能量积累速度降低和中途停留时间延长被认为是因为换羽消耗了大量的能量^[29]。然而,羽再生[树]麻雀选择降低能量收支水平进而导致了体内能量储备的消耗,而不是换羽消耗了大量的能量。消耗体内能量储备的收益很可能要大于通过增加摄食量所获得的收益,这样的选择有可能与食物可获得性有关^[4-5]。

鸟的体重变化与脂肪代谢和蛋白质含量变化密切相关^[27]。迁徙期间的小型雀形目鸟类73%—82%的体重增加是由于脂肪含量增加引起,其余主要为

湿蛋白^[30]。迁徙途中鸟类体内能量储备不足时,器官组织中的蛋白质可通过分解释放能量^[31]。体内脂肪和蛋白质含量的比例将直接影响着鸟类可以储存能量的多少^[32]。体内能量储备减少也可以减轻体重和带来运动能耗减少的收益。结果表明,能量摄入减少、体内能量储备消耗和器官总质量减少导致羽再生[树]麻雀体重降低。受羽功能差异影响,觅食能耗很可能是其能量收支水平降低的诱因。CF组体重增加与生存压力降低有关。FF和TF组体重降低的显著差异是它们选择了不同的能量收支对策和羽再生投资对策的最终结果。水是动物体内储存热能的重要介质。单位排泄水量,体温低的鸟类意味着排出相对少的热能。体温与鸟类个体的能量预算密切相关。相关研究发现,摄食低能食物的[树]麻雀采取了降低体温调节标准的节能预算对策^[4]。羽再生[树]麻雀并没有选择降低体温的节能预算对策,这或许与其体内水分含量有关。

3.3 器官响应

器官的功能能力与个体能量的摄入、转化和储存密切相关,器官质量、功能和自身能耗的变化可以反映出器官水平对个体能量预算对策的响应,也是个体成功适应生存环境的关键^[4]。器官的功能过剩将白白消耗过剩能力那部分能量^[16-17]和增加夜晚的维持能耗。器官组织中蛋白质的分解获能可引起器官质量减少^[31]。迁徙鸟类即将开始迁徙以及迁徙过程中消化器官和能量转化器官会发生萎缩,导致能量摄入效率降低和获得总能耗减少的收益^[30]。

器官功能与自身能耗之间的能量预算是个体能量预算的重要组成部分,功能增加需要器官质量和自身能耗增加的响应。消化器官与能量摄入密切相关^[30,33]。通过胃容积增大来增加食糜储备可以减少觅食能耗、延长夜晚维持能耗的供给和减少体内能量储备的支出^[4]。小肠长度增加可延长食糜的消化和吸收时间。最佳消化模型^[34-35]认为,延长食糜在消化道内的滞留时间可提高能量的消化和摄取效率。然而,羽再生[树]麻雀并没有选择这些生存对策。夜晚或停止觅食后,消化器官将慢慢开始成为功能过剩的能耗器官。所以,增加消化道器官功能是高投资—高收益—高能耗的投资方式。反之,通过降低这些器官能耗的收支对策最终结果也仍有可能是盈余或收益更大。羽再生[树]麻雀消化道器官

的变化属于后者,能量收支水平也因此降低。其它器官,如心脏、肾脏(组织增生)、脑、肝脏、肺也均有不同程度的响应。盲肠组间明显的变化趋势和较大的个体差异可能与食物质量和摄能需求有关。

总之,羽再生[树]麻雀对其内脏器官主要选择了精简器官和高效节能的能量预算对策。

3.4 水代谢散热调节

鸟类高体温主要依赖于产热和保温^[20,23],快速和有效的散热调节是其维持体温恒定和避免体温升高造成机体内部损伤的关键。皮肤薄、松和缺乏腺体是鸟类进化的特点。鸟类唯一的皮脂腺称尾脂腺(oil gland或 uropygial gland)。与多数哺乳类动物汗液蒸发散热不同,鸟类只能通过呼吸蒸发(少量水分)和泄殖腔排出粪尿混合物的方式进行散热调节。深、急呼吸虽然可以带走相对多的热量,但是这种散热是有限的。本文是在相同环境和假设[树]麻雀个体含水量保持不变的前提下计算水代谢热能散失,即排出体外的水(包括泄殖腔的排泄物和呼吸)等于摄入的水(饮用和食物中所含的水),摄入与环境温度相同的水和排出与体温相同的水。通常环境温度低于鸟类的体温,摄入水可以起到降温作用。摄入水散热会使体重和运动能耗增加,排出水散热会使体重和运动能耗减少,后者收益大于前者。取水降温也往往会受到客观因素的限制,因此不会成为精确和有效的散热调节方式。

鸟类排泄粪尿混合物的方式可以进行精确和有效的散热吗?鸟类及时排出粪尿混合物,通过减轻体重来减少飞行能耗。摄入低于体温的水或排出等于体温的水,都可以使单位体重的热量保持不变。然而,需要散热的鸟类更多是因为剧烈运动。[树]麻雀日代谢水的质量约为其自身体重的1/4,3组[树]麻雀日平均排泄次数最少为56.11次/只和最多为96.34次/只,粪便的形状差异取决于排泄的固形物和含水量的比例,这些证据都表明排泄粪尿混合物中的水是其散热调节的关键,通过排泄次数和每次不同的水量实现精确、迅速和有效的散热,排出能使体温升高的多余热量,维持体温恒定(图1)。排泄次数能够间接反映出散热调节的次数。本文认为,这种散热调节应该是鸟类物种所特有的、迅速的和有效的散热调节方式。虽然水代谢热能散失的总量约占摄入能的0.5%和平均单次排泄热量散失约

为 5×10^{-3} kJ, 但是通过调节排泄次数和单次不同的水量来精确的排出多余的热量, 对于维持体温相对恒定却有着极其重要的生理意义。这与多数哺乳动物的汗液蒸发散热、爬行动物对环境的热依赖性和行为调节以及鱼类选择环境温度不同。

个体含水量和代谢水量的差异会对体重产生影响, 进而也会影响其相应的运动能耗。羽再生[树]麻雀选择了减少摄水量和水代谢散热的生存对策。组间, 羽补偿 I 期, FF 组和 TF 组的排泄次数表明水代谢散热调节的次数减少和行为控制能力减弱导致运动行为相应减少。羽再生 II 期, TF 组排泄次数迅速恢复至 CF 组水平, 水代谢散热调节的次数和行为控制能力逐渐增强。羽翼丰满 III 期, 排泄次数, CF 组、TF 组增加和 FF 组减少 ($P < 0.001$) (图 2)。组内, CF 组排泄次数 III 期比 I、II 期增加极显著 ($P < 0.001$), 意味着适应环境后其散热调节次数增加。TF 组表现出与 CF 组相同的变化趋势。FF 组 I 至 III 期排泄次数的递减趋势与再生飞羽的投资预算减少和保温能力下降有关, 同时也表明飞羽参与个体保温和保温能力降低导致需要散热的次数相对减少 (图 2)。总之, 这些都反映出它们不同时期存在不同的散热调节和行为控制能力, 即选择了不同的散热调节对策。

References:

- [1] Alexander R M. Energy of Animal Life. Oxford: Oxford University Press, 1999: 63-68.
- [2] Johnson M S, Thomson S C, Speakman J R. Limits to sustained energy intake I. Lactation in the laboratory mouse *Mus musculus*. Journal of Experimental Biology, 2001, 204(11): 1925-1935.
- [3] Speakman J R, Król E. Limits to sustained energy intake IX: a review of hypotheses. Journal of Comparative Physiology B, 2005, 175(6): 375-394.
- [4] Yang Z H, Shao S L. The influence of different food qualities on the energy budget and digestive tract morphology of Tree Sparrows *passer montanus*. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(14): 3937-3946.
- [5] Klaasen M, Oltrogge M, Trost L. Basal metabolic rate, food intake, and body mass in cold-and warm-acclimated Garden Warblers. Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular and Integrative Physiology, 2004, 137(4): 639-647.
- [6] Heinrich B. Why have some animals evolved to regulate a high body temperature. The American Naturalist, 1977, 111(980): 623-640.
- [7] Avery R A. Institute of Biology's Studies in Biology. Baltimore: University Park Press, 1979: 56-56.
- [8] Dejours P, Bolis L, Taylor C R, Weibel E R. Comparative Physiology: Life in Water and on Land. Padova, Italy: Liviana Press, 1987: 421-431.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Ashton K G. Patterns of within-species body size variation of birds: strong evidence for Bergmann's rule. Global Ecology and Biogeography, 2002, 11(6): 505-523.
- [13] Polo V, Crrascal L M. Nocturnal body mass loss in coal tits *Periparus ater*: the combined effects of ambient temperature and body reserves. Acta Zoologica Sinica, 2008, 54(4): 615-621.
- [14] Bairlein F. How to get fat: nutritional mechanisms of seasonal fat accumulation in migratory songbirds. Naturwissenschaften, 2002, 89(1): 1-10.
- [15] Swanson D L. Are summit metabolism and thermogenic endurance correlated in winter acclimatized passerine birds?. Journal of Comparative Physiology B, 2001, 171(6): 475-481.
- [16] Stark J M, Beese K. Structural flexibility of the intestine of *Burmese python* in response to feeding. Journal of Experimental Biology, 2001, 204(2): 325-335.
- [17] Weibel E R. Symmorphosis and optimization of biological design: introduction and questions // Weibel E R, Taylor C R, Bolis L, eds. Principles of Animal Design. Cambridge: Cambridge University Press, 1998: 1-314.
- [18] Vezina F, Williams T D. Plasticity in body composition in breeding birds: what drives the metabolic costs of egg production? Physiological and Biochemical Zoology, 2003, 76(5): 716-730.
- [19] Mackinnon J, Phillipps K. A Field Guide to the Birds of China. London: Oxford University Press, 2000: 312-340.
- [20] 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 Part A: Molecular and Integrative Physiology, 2008, 151(4): 519-525.
- [21] Hammond K A, Diamond J. Maximal sustained energy budgets in humans and animals. Nature, 1997, 368(6624): 457-462.
- [22] Scheiffarth G, Wahls S, Ketzenberg G, Exo K. Spring migration strategies of two populations of bar-tailed godwits, *Limosa lapponica*, in the Wadden Sea: time minimizers or energy

- minimizers? *Oikos*, 2002, 96(2): 346-354.
- [23] Król E, Speakman J R. Limits to sustained energy intake IV. Energetics of lactation in laboratory mice at thermoneutrality. *Journal of Experimental Biology*, 2003, 206(23): 4255-4266.
- [24] Klaassen M, Lindström Å. Departure fuel loads in time minimizing migrating birds can be explained by the energy costs of being heavy. *Journal of Theoretical Biology*, 1996, 183(1): 29-34.
- [25] Ebbinge B S, Spaans B. The importance of body reserves accumulated in spring staging areas in the temperate zone for breeding in Dark bellied Brent Geese *Branta b. bernicla* in the high Arctic. *Journal of Avian Biology*, 1995, 26(2): 105-113.
- [26] Farmer A H, Wiens J A. Models and reality: time-energy trade-offs in pectoral sandpiper *Calidris melanotos* migration. *Ecology*, 1999, 80(8): 2566-2580.
- [27] Odum E P, Rogers D T, Hicks D L. Homeostasis of the nonfat components of migrating birds. *Science*, 1964, 143(3610): 1037-1039.
- [28] van der Veen I T, Lindstrom K M. Escape flights of yellowhammers and greenfinches: more than just physics. *Animal Behaviour*, 2000, 59(3): 593-601.
- [29] Schaub M, Jenni L. Stopover durations of three warbler species along their autumn migration route. *Oecologia*, 2001, 128(2): 217-227.
- [30] Klaassen M, Lindström Å, Zijlstra R. Composition of fuel stores and digestive limitations to fuel deposition rate in the long-distance migratory thrush nightingale, *Luscinia luscinia*. *Physiological Zoology*, 1997, 70(1): 125-133.
- [31] Landys-Ciannelli M M, Jukema J, Piersma T. Blood parameter changes during stopover in a long-distance migratory shorebird, the bar-tailed godwit *Limosa lapponica taemyrensis*. *Journal of Avian Biology*, 2002, 33(4): 451-455.
- [32] Ma Z J, Wang Y, Chen J K. Physiological ecology of migratory birds during the stopover periods. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(11): 3067-3075.
- [33] Lindström Å, Klaassen M, Kvist A. Variation in energy intake and basal metabolic rate of a bird migrating in a wind-tunnel. *Functional Ecology*, 1999, 13(3): 352-359.
- [34] Cochran P A. Optimal digestion in a batch-reactor gut: the analogy to partial prey consumption. *Oikos*, 1987, 50(2): 268-270.
- [35] Del Rio C M, Karasov W H. Digestion strategies in nectar-and fruit-eating birds and the sugar composition of plant rewards. *The American Naturalist*, 1990, 136(5): 618-637.

参考文献:

- [4] 杨志宏, 邵淑丽. 食物质量差异对树麻雀能量预算和消化道形态特征的影响. *生态学报*, 2011, 31(14): 3937-3946.
- [32] 马志军, 王勇, 陈家宽. 迁徙鸟类中途停歇期的生理生态学研究. *生态学报*, 2005, 25(11): 3067-3075.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.34, No.10 May, 2014 (Semimonthly)
CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Landscape sustainability and landscape sustainability science ZHAO Wenwu, FANG Xuening (2453)
- A diagnostic framework of payments for ecosystem services and associated case studies
..... ZHU Wenbo, WANG Yang, LI Shuangcheng (2460)
- Progress in research of iron plaque on root surface of wetland plants
..... LIU Chunying, CHEN Chunli, GONG Xiaofeng, et al (2470)
- Ecological effects of predator chemical cues in aquatic ecosystem QIN Guangqiu, LU Haoliang, TANG Zhenzhu, et al (2481)
- Secondary substances and their ecological effects on seed dispersal in vertebrate-dispersed fleshy fruit plants
..... PAN Yang, LUO Fang, LU Changhu (2490)

Autecology & Fundamentals

- Responses of CH₄ uptake rates to simulated N deposition in a nature forest in mid-subtropical China
..... CHEN Chaoqi, YANG Zhijie, LIU Xiaofei, et al (2498)
- Ecological characteristics of *Phragmites australis* and their relationship to water-salt indicators in dry habitats of the southern
marginal zones of the Tarim Basin, China GONG Lu, ZHU Meiling, TASHPOLAT · Tiyip, et al (2509)
- Threshold effect of soil moisture on photosynthetic and physiological parameters in *Rosa xanthina* L. and its photosynthetic
productivity classification ZHANG Shuyong, XIANG Jiangbao, ZHANG Guangcan, et al (2519)
- Contrasting responses of soil respiration to litter manipulation in subtropical *Mytilaria laosensis* and *Cunninghamia lanceolata*
plantations YU Zaipeng, WAN Xiaohua, HU Zhenhong, et al (2529)
- Potassium application for increased jasmonic acid content and defense enzyme activities of wheat leaves infested by aphids
..... WANG Yi, ZHANG Yueling, SU Janwei, et al (2539)
- Combined effects of elevated O₃ concentration and reduced solar irradiance on photosynthetic activity and energy dissipation
of winter wheat SUN Jian, ZHENG Youfei, et al (2548)
- Colonization dynamics of *Bacillus cereus* B3-7 on wheat roots and control efficiency against sharp eyespot of wheat
..... HUANG Qiubin, ZHANG Ying, LIU Fengying, et al (2559)
- Quantitative study of water consumption characteristics of winter wheat under deficit irrigation
..... ZHANG Xingjuan, XUE Xuzhang, GUO Wenzhong, et al (2567)
- Assessment on the ecological fitness of anti-fungal transgenic rice LI Wei, GUO Jianfu, YUAN Hongxu, et al (2581)
- A proteomic analysis of *Arachis hypogaea* leaf in responses to enhanced ultraviolet-B radiation
..... DU Zhaokui, LI Junmin, ZHONG Zhangcheng, et al (2589)
- Composition of fatty acids from suspended particulate matter in southern South China Sea
..... LIU Huaxue, KE Changliang, LI Chunhou, et al (2599)
- The influence of age, flock size, habitat, and weather on the time budget and the daily rhythm of wintering Siberian Cranes
in Poyang Lake YUAN Fangkai, LI Yankuo, LI Fengshan, et al (2608)
- The energy budget and water metabolism heat regulation of tree sparrows *Passer montanus* of toba compensatory regeneration
..... YANG Zhihong, WU Qingming, YANG Miao, et al (2617)
- The effect of low-dose of pesticide on predation of spider and its preliminary mechanisms LI Rui, LI Na, LIU Jia, et al (2629)
- Response of the alligator weed flea beetle, *Agasicles hygrophila* (Coleoptera: Chrysomelidae) to overwintering protection and
its controlling effect on alligator weed *Alternanthera philoxeroides* (Amaranthaceae: Alternanthera)
..... LIU Yufang, WANG Xiuxiu, LI Fei, et al (2638)

Population, Community and Ecosystem

- The effect of climate change on the population fluctuation of the Siberian crane in Poyang Lake LI Yankuo, QIAN Fawen, SHAN Jihong, et al (2645)
- Characteristics of soil phosphorus fractions in wetlands with various restoration age in caizi lake, Anhui Province LIU Wenjing, ZHANG Pingjiu, DONG Guozheng, et al (2654)
- Multivariate analysis of the relations between phytoplankton assemblages and environmental factors in Chagan Lake Wetland LI Ranran, ZHANG Guangxin, ZHANG Lei (2663)
- Diversity of methanogen communities in tidal freshwater and brackish marsh soil in the Min River estuary ZENG Zhihua, YANG Minhe, SHE Chenxing, et al (2674)
- The influence of environment and phylogenetic background on variation in leaf and fine root traits in the Yanhe River catchment, Shaanxi, China ZHENG Ying, WEN Zhongming, SONG Guang, et al (2682)
- Changes of soil properties in re-vegetation stages on sloping-land with purple soils in hengyang of Hunan Province, South-central China YANG Ning, ZOU Dongsheng, YANG Manyuan, et al (2693)
- Vulnerability assessment on the mangrove ecosystems in qinzhou bay under sea level rise LI Shasha, MENG Xianwei, GE Zhenming, et al (2702)
- Dynamics of biomass and productivity of three major plantation types in southern China DU Hu, ZENG Fuping, WANG Kelin, et al (2712)
- Fungal diversity in *Cunninghamia lanceolata* plantation soil HE Yuanhao, ZHOU Guoying, WANG Shenjie, et al (2725)
- Response of sandy vegetation characteristics to precipitation change in Horqin Sandy Land ZHANG Lamei, LIU Xiping, ZHAO Xueyong, et al (2737)
- Characteristics of carbon storage and sequestration of *Robinia pseudoacacia* forest land converted by farmland in the Hilly Loess Plateau Region SHEN Jiapeng, ZHANG Wenhui (2746)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Forest microclimate change along with the succession and response to climate change in south subtropical region LIU Xiaodong, ZHOU Guoyi, CHEN Xiuzhi, et al (2755)
- Drought variations of winter wheat in different growth stages and effects of climate trend in Huang-Huai-Hai Plain, China XU Jianwen, JU Hui, LIU Qin, et al (2765)

Resource and Industrial Ecology

- A method of environment assessment of mineral resources planning for shanxi provinces base on GIS LIU Wei, DU Peijun, LI Yongfeng (2775)
- A new approach to assess the water footprint of hydropower: a case study of the Miyun reservoir in China ZHAO Dandan, LIU Junguo, ZHAO Xu (2787)

《生态学报》2014 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

本期责任副主编 祖元刚 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 34 卷 第 10 期 (2014 年 5 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 34 No. 10 (May, 2014)

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

主 编 王如松
主 管 中国科学技术协会
主 办 中国生态学学会
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

出 版 科 学 出 版 社
地址:北京东黄城根北街 16 号
邮政编码:100717

印 刷 北京北林印刷厂
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

订 购 全国各地邮局
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

广告经营 京海工商广字第 8013 号
许 可 证

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

Editor-in-chief WANG Rusong
Supervised by China Association for Science and Technology
Sponsored by Ecological Society of China
Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS
Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China

Published by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China

Printed by Beijing Bei Lin Printing House,
Beijing 100083, China

Distributed by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North
Street, Beijing 100717, China
Tel: (010)64034563
E-mail: journal@cspg.net

Domestic All Local Post Offices in China
Foreign China International Book Trading
Corporation
Add: P.O.Box 399 Beijing 100044, China



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元