

不同氧浓度下树麻雀形态和生理性状的可塑性初探

冯冉¹ 安伯羽² 何静静¹ 徐源蔚² 任禾¹ 熊鹰³ 范丽卿^{2*}

(1. 西藏农牧大学 资源与环境学院; 2. 西藏农牧大学 高原生态研究所, 青藏高原森林生态教育部重点实验室/西藏林芝陆生野生动物疫源疫病监测站, 西藏林芝 860000; 3. 河北师范大学 生命科学学院, 河北石家庄 050000)

摘要 低氧是影响高海拔动物生存的关键因素之一。为了探索高原动物在不同氧浓度下的表型是否具有可塑性, 本研究以来自拉萨的树麻雀 (*Passer montanus*) 作为研究对象, 于2024年开展了常氧和低氧两种环境下的试验, 比较了试验前后树麻雀体重和生理性状的差异。结果显示, 试验后, 低氧组的树麻雀比常氧组具有显著更高的血红蛋白浓度和红细胞比容。试验前后, 常氧组的树麻雀各项测量指标均无显著变化; 低氧组的树麻雀显著降低了其体重和空腹血糖浓度, 但血红蛋白浓度和红细胞比容无显著变化。此外, 低氧组的树麻雀胸大肌和肺相对更重, 但这些差异均未达到显著水平。

关键词 树麻雀; 低氧; 高海拔; 表型可塑性

中图分类号: Q958

文献标志码: A

文章编号: 2096-4781 (2026) 04-0502-06

DOI: 10.19707/j.cnki.jp.a.2026.04.010

A Preliminary Study of the Plasticity of Morphology and Physiological Traits in Eurasian Tree Sparrows Under Different Oxygen Concentrations

FENG Ran¹, AN Boyu², HE Jingjing¹, XU Yuanwei², REN He¹, XIONG Ying³, FAN Liqing^{2*}

(1. Resources & Environment College, Xizang Agricultural & Animal Husbandry University; 2. Key Laboratory of Forest Ecology in Xizang Plateau of the Ministry of Education/Linzi National Monitoring Station of Epidemic Source & Disease of Terrestrial Wild Animals, Institute of Plateau Ecology, Xizang Agricultural & Animal Husbandry University; Linzi, Xizang 860000, China; 3. College of Life Sciences, Hebei Normal University, Shijiazhuang, Hebei 050000, China)

Abstract: Hypoxia is one of the critical factors that affect the survival of animals inhabiting high-altitude environments. In order to investigate whether animals respond differently to varying oxygen concentrations, the present study examined the phenotypic plasticity of the Eurasian tree sparrows (*Passer montanus*), which were sampled from the Lasa region in 2024, under an experimental context of controlling oxygen concentrations. The results indicated, after the experiment, the Eurasian tree sparrows in the low oxygen group had significantly higher hemoglobin concentration and hematocrit than those in the normoxic group. Before and after the experiment, there were no significant changes in various measurement indicators of sparrows in

收稿日期: 2025-11-04

作者简介: 冯冉 (1998-), 女, 汉族, 河南安阳人, 硕士生。研究方向: 主要从事野生动植物保护与利用方面的研究。

通信作者: 范丽卿 (1982-), 女, 汉族, 福建大田人, 博士, 副教授。研究方向: 主要从事动物生态学方面的研究。

基金项目: 西藏自治区自然科学基金项目 (XZ202201ZR0056G); 西藏农牧学院林学博士点 (二期) (533325002); 西藏自治区2025年度中央引导地方科技发展资金项目 (XZ202501YD0016)。

the normoxic group; the sparrows in the hypoxia group significantly reduced their body weight and fasting blood glucose concentration, but there were no significant changes in hemoglobin concentration and hematocrit. In addition, the chest muscles and lungs of the sparrows in the low oxygen group were relatively heavier, though the differences did not reach a significant level.

Key words: Eurasian tree sparrows; Hypoxia; High altitude; Phenotypic plasticity

有氧代谢是脊椎动物主要的代谢方式，为正常生命活动提供了80%的能量^[1]，氧气是其生命和健康的保障。在海拔超过2 500 m的高原或高山，低氧是影响动物生存的主要环境因子之一^[2]。低氧环境（缺氧）将限制动物机体有氧代谢、促进无氧代谢，破坏代谢稳态与能量平衡，引起全身反应，对心血管系统、呼吸系统、神经系统等造成多器官损伤^[3]。

高海拔物种在形态与生理表型上演化出了丰富多样的适应策略以应对低氧环境，这些适应性性状由不同的遗传基础（长期进化）或表型可塑性（短期习服）驱动^[4]。其中，短期习服能增强相同基因型的个体对低氧环境的适应，常表现为提高呼吸频率和血红蛋白浓度以增强氧气运输能力等^[2]。

树麻雀（*Passer montanus*）广泛分布于欧亚大陆，伴随人类栖居，在几千至几万年前随藏人迁入青藏高原后，表型快速演化，如体重、肌肉增加，提高飞行肌低氧抗性、毛细血管密度和线粒体丰富度等^[5,6]。然而，除了遗传分化外^[2]，这些表型变化是否还是表型可塑性的结果，至今缺少试验性的证据。此外，海拔的改变除了带来氧气的变化外，还伴随着温度和气压等环境因子的变化，因此，这些表型的变化可能并不完全是低氧造成的。

为了验证树麻雀体型和生理性状应对不同低氧条件的可塑性，本项目以野外采集的树麻雀作为研究对象，在实验室条件下控制不同的氧浓度，比较了试验前、后个体的体重、血红蛋白、红细胞比容、血糖浓度等生理参数的变化。研究结果证实了部分生理性状具有明显的可塑性，是树麻雀快速适应环境变化的基础。

1 研究方法

1.1 材料与人工饲养试验

2024年8月，对来自拉萨（海拔3 670 m）的树麻雀成体开展人工饲养试验。野外抓回的麻雀，先在实验室的鸟舍内饲养1个月，以消除应激反应。根据树麻雀野外分布海拔上限、下限的大气氧含量，设置低氧组（氧气浓度10%）和常氧组（氧气浓度21%）。将20只体重相当（图1）的树麻雀随机分为2组，每组各10只个体。将分组后的树麻雀饲养于常规家用鸟笼（60 cm × 41 cm × 41 cm），放入可调节氧气浓度的饲养箱内进行饲养，饲养箱内的氧气浓度每天逐步增加或降低1%，直至最终试验的氧浓度，再持续饲养1个月。自野外捕捉后，所有麻雀的饲喂食物统一为带壳五谷。试验期间，每两天进行一次打扫、更换水和食物。除氧浓度外，饲养条件为：光照12 h/d，温度23 °C ~ 25 °C。饲养试验结束后，测量体重（0.01 g）、空腹血糖浓度（0.1 mmol/L）、血红蛋白浓度（0.1 g/L）和红细胞比容（0.1%），测量心脏、肺、胸大肌等组织的重量（0.001 g）。

在试验过程中，常氧组和低氧组分别有4只和2只个体由于意外受伤和逃逸退出试验。本研究最终得

到了常氧组6只和低氧组8个个体的试验数据。

1.2 数据分析

应用独立样本检验,比较试验前和试验后树麻雀的体重和生理参数在常氧组和低氧组之间的差异,再应用相关样本检验,分别比较了树麻雀在常氧组和低氧组内试验前与试验后的体重和生理参数之间的差异。因样本量较小,本研究采用非参数检验的结果。

所有的统计分析均在SPSS (v.27.0)中完成。体重和生理参数的描述性结果用平均值 $\pm$ SE表示,判定是否显著性的 P 值以0.05作为标准。

2 结果

2.1 常氧组和低氧组之间的差异

独立样本克鲁斯卡尔-沃利斯检验 (Kruskal-Wallis test) 结果显示,试验前,常氧组 ($19.06 \text{ g} \pm 0.49 \text{ g}$, $n=6$) 和低氧组 ($19.61 \text{ g} \pm 0.56 \text{ g}$, $n=8$) 的体重没有显著差异 ($P=0.439$); 试验后,常氧组 ($18.28 \text{ g} \pm 0.30 \text{ g}$, $n=6$) 和低氧组 ($18.52 \text{ g} \pm 0.48 \text{ g}$, $n=8$) 的体重也没有显著差异 ($P=0.439$; 图1)。

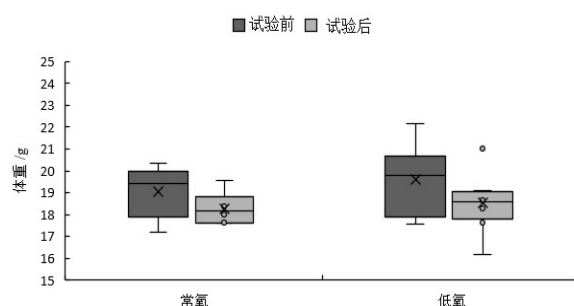


图1 常氧组和低氧组在试验前、后的体重

Fig.1 Body weight of the normoxia group and the hypoxia group before and after the experiment

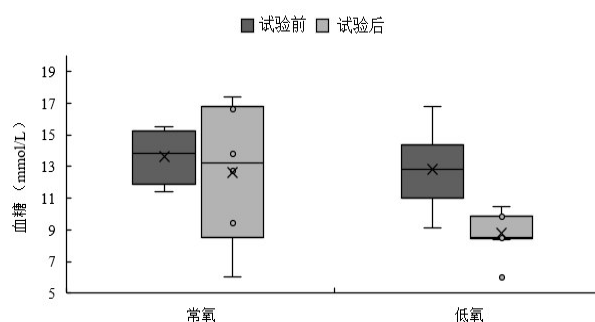


图2 常氧组和低氧组在试验前、后的血糖

Fig.2 Blood sugar levels in the normal oxygen group and the low oxygen group before and after the experiment

试验前,常氧组的空腹血糖 $13.612 \text{ mmol/L} \pm 0.722 \text{ mmol/L}$, $n=6$ vs $12.812 \text{ mmol/L} \pm 0.838 \text{ mmol/L}$, $n=8$, $p=0.477$; (图2)、血红蛋白浓度 $14.083 \text{ g/L} \pm 0.991 \text{ g/L}$, $n=6$ vs $13.500 \text{ g/L} \pm 0.783 \text{ g/L}$, $n=8$, $P=0.796$ (图3); 和红细胞比容 $42.250\% \pm 2.973\%$, $n=6$ vs $41.175\% \pm 2.490\%$, $n=8$, $P=1$ (图4); 与低氧组也没有显著差异。

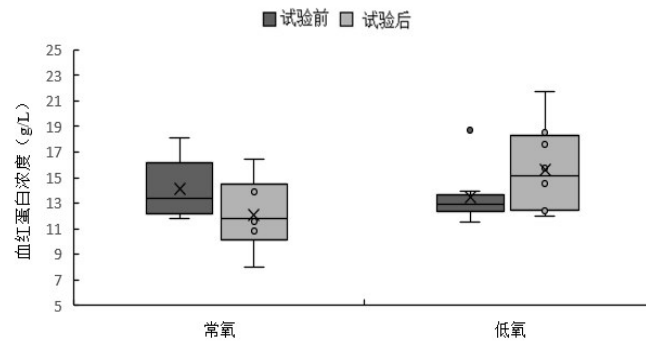


图3 常氧组和低氧组在试验前、后的血红蛋白浓度

Fig.3 Hemoglobin concentration in the normal oxygen group and the low oxygen group before and after the experiment

试验后，低氧组树麻雀比常氧组具有更高的血红蛋白浓度 $15.64 \text{ g/L} \pm 1.21 \text{ g/L}$, $n=8$ vs $12.12 \text{ g/L} \pm 1.16 \text{ g/L}$, $n=6$, $P=0.045$, (图3) 和红细胞比容 $46.91\% \pm 3.64\%$, $n=8$ vs $36.35\% \pm 3.49\%$, $n=6$, $P=0.045$; (图4), 但空腹血糖在低氧组和常氧组间没有显著差异 $8.78 \text{ mmol/L} \pm 0.49 \text{ mmol/L}$, $n=8$ vs $12.65 \text{ mmol/L} \pm 1.77 \text{ mmol/L}$, $n=14$, $P=0.081$, (图2)。

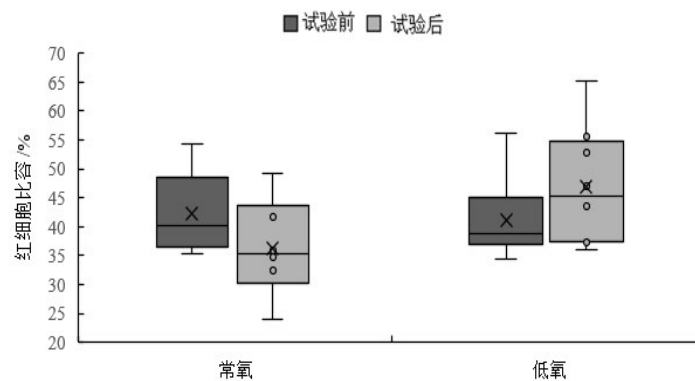


图4 常氧组和低氧组在试验前、后的红细胞比容

Fig.4 Hematocrit of the normal oxygen group and the low oxygen group before and after the experiment

在内脏器官重量与体重的占比上，试验后，低氧组的麻雀比常氧组具有相对更轻的心脏 $1.501\% \pm 0.072\%$, $n=8$ vs $1.527\% \pm 0.066\%$, $n=6$, $P=0.699$, 更重的胸大肌 $14.048\% \pm 0.839\%$, $n=8$ vs $12.527\% \pm 1.361\%$, $n=13$, $P=0.245$ 和肺 $2.732\% \pm 0.132\%$, $n=8$ vs $2.639\% \pm 0.096\%$, $n=6$, $P=0.796$, 但这些内脏器官的相对重量在两组之间均没有显著差异。

2.2 常氧组试验前、后的比较

威尔科克森符号秩检验 (Wilcoxon Signed-Rank Test) 样本结果表明，与试验前相比，试验后常氧组的树麻雀体重有所下降，但差异不显著 ($P=0.075$, $n=6$; 图1)。其空腹血糖 ($P=0.833$, $n=6$; 图2)、血红蛋白 ($P=0.116$, $n=6$; 图3) 和红细胞比容 ($P=0.116$, $n=6$; 图4) 在试验前后也都没有显著变化。

2.3 低氧组试验前、后的比较

与试验前相比，低氧组树麻雀的体重在试验后显著下降 ($P=0.036$, $n=8$; 图1)，其空腹血糖浓度 (P

=0.025, $n=8$; 图2)也显著下降。但试验前后,低氧组的血红蛋白($P=0.058$, $n=8$; 图3)和红细胞比容($P=0.058$, $n=8$; 图4)没有显著变化。

3 讨论

试验前,常氧组和低氧组的树麻雀在体重、空腹血糖、血红蛋白浓度和红细胞比容上均没有显著差异,说明本次试验分组合理。常氧组树麻雀的体重在试验前和试验后没有显著变化,说明树麻雀可以适应本次试验的环境、应激较低。

试验后,低氧组的树麻雀比常氧组具有显著更高的血红蛋白浓度和红细胞比容,这些变化可以提高机体的氧气输送能力以缓解低氧压力,发生在许多高海拔脊椎动物中^[7],如野牦牛^[8]、藏驴^[9]以及多种鸟类^[10]。缺氧环境可启动缺氧诱导因子(HIF)信号通路,刺激促红细胞生成素(EPO)产生,促进红细胞生成,导致血红蛋白浓度上升、红细胞比容增加^[11,12]。

在实验室低氧条件下,树麻雀显著降低了其体重。高海拔的鸟类往往具有更大的体型,如Sun等人^[13]发现树麻雀的体重和翅长与纬度无关,但与海拔显著正相关,即其高海拔种群所具有的更大体型并非温度而是低压或低氧等其他因素造成的。短期低氧习服的情况下,树麻雀的体重下降可能与低氧所带来的代谢压力有关,低氧可导致食欲下降、摄食量减少^[14,15]、能量利用率降低、基础代谢率(BMR)升高^[16]等一系列变化,从而造成体重下降。

低氧组的树麻雀显著降低了其空腹血糖浓度,这与对树麻雀野外种群的研究结果一致,与低海拔种群相比,高海拔的树麻雀上调了*Slc2a12*基因的表达,增强了胰岛素敏感性和葡萄糖稳态,抵抗低氧带来的能量代谢胁迫^[17]。类似的,在10%氧气浓度的缺氧环境中,小鼠血糖显著下降,同时胰岛素敏感性提高、红细胞比容增加,血糖的变化可能与缺氧环境下促红细胞生成素(EPO)的分泌增加有关^[18]。

自然环境下,高海拔的树麻雀具有比低海拔树麻雀相对更大的心脏和肺^[13],更多的胸大肌^[5,6]。更大的心脏有助于提升高海拔鸟类的心排血量和血氧输送。一些高海拔鸟类增大其肺部体积和肺表面积^[6,19],肺部血气屏障更薄、毛细血管密度更高^[20],以提高氧气交换效率。增加肌肉占比可以抵抗低氧环境下的肌肉萎缩、避免体重减轻,以抵抗低氧带来的能量代谢压力。高海拔鸟类的胸大肌毛细血管密度、毛细血管-纤维比以及线粒体体积密度均显著提升,提升了氧输送和氧化代谢能力^[6],并具有更粗的胸大肌肌纤维和更大的收缩单元,有助于在低氧环境下产生更大的收缩力^[21]。本次试验后,低氧组比常氧组具有相对更轻的心脏、相对更重的胸肌和肺,但未在统计学上达到显著差异,这可能与样本量较少有关。此外,鸟类演化出了丰富的低氧适应机制,一些形态学或组织结构的变化并非绝对的适应性特征^[6]。树麻雀为野生鸟类,人工饲养的难度较大,今后需进一步增加样本量来验证这些组织在不同氧浓度下的变化。

本次试验发现,低氧情况下,树麻雀显著降低了其体重和空腹血糖浓度,并具有比常氧饲养的树麻雀显著高的血红蛋白浓度和红细胞比容,这暗示体重、血糖浓度、血红蛋白浓度和红细胞比容是树麻雀应对低氧胁迫的部分可塑性状。动物表型对低氧的适应体现在形态、生理、生化等诸多方面,今后,应当更全面地检验在试验控制条件下,更多表型特征的变化,如红细胞数量、血氧亲和力、线粒体数量与大小、肌纤维形态、呼吸代谢酶活性等。此外,还可结合比较基因组和转录组等组学研究,探索鸟类表型可塑性在低氧适应中的作用机制。

4 结论

经过常氧和低氧环境的短期习服试验后,低氧组的树麻雀比常氧组具有显著更高的血红蛋白浓度和红细胞比容。与试验前相比,试验后的低氧组树麻雀显著降低了其体重和空腹血糖浓度,而常氧组的各项指标没有发生变化。本次试验发现拉萨树麻雀在应对低氧胁迫时,其体重、血糖浓度、血红蛋白浓度和红细胞比容发生了可塑性的变化。

参考文献:

- [1] Rich P: Chemiosmotic coupling: The cost of living[J]. *Nature*, 2003, 421(6923): 583.
- [2] 熊鹰, 雷富民. 鸟类对高海拔环境的适应性演化: 从表型到基因组[J]. *中国科学: 生命科学*, 2019, 49: 361-370.
- [3] Semenza GL. Oxygen sensing, hypoxia-inducible factors, and disease pathophysiology[J]. *Annual Reviews in Pathology: Mechanisms of Disease*, 2014, 9: 47-71.
- [4] Monge C, León-Velarde F. Physiological adaptation to high altitude: Oxygen transport in mammals and birds[J]. *Physiological Reviews*, 1991, 71: 1135-1172.
- [5] Qu Y, Chen C, Xiong Y, et al. Rapid phenotypic evolution with shallow genomic differentiation during early stages of high elevation adaptation in Eurasian Tree Sparrows[J]. *National Science Review*, 2020, 7: 113-127.
- [6] Xiong Y, Fan L, Hao Y, et al. Physiological and genetic convergence supports hypoxia resistance in high-altitude songbirds[J]. *PLoS Genet*, 2020, 16(12): e1009270.
- [7] Storz J F, Scott G R, Cheviron Z A. Phenotypic plasticity and genetic adaptation to high-altitude hypoxia in vertebrates[J]. *Journal of Experimental Biology*, 2010, 213: 4125-4136.
- [8] 袁青妍, 谢庄. 动物对高原低氧的适应性研究进展[J]. *生理科学进展*, 2005, 36(2): 179-182.
- [9] 韩旭, 万宝云, 孔小艳, 等. 藏驴的血液生理学特性研究[J]. *经济动物学报*, 2015, 19(1): 47-50.
- [10] 秦耀军. 青藏高原五种雀形目鸟类血液气体运输特性的研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2013.
- [11] 陈伟. 低氧诱导促红细胞生成素基因表达的机制[J]. *临床与病理杂志*, 2000, 20(6): 467-470.
- [12] Graham A M, Peters J L, Wilson R E, et al. Adaptive introgression of the beta-globin cluster in two Andean waterfowl[J]. *Heredity*, 2021, 127: 107-123.
- [13] Sun Y F, Ren Z P, Wu Y F, et al. Flying high: Limits to flight performance by sparrows on the Qinghai-Tibet plateau[J]. *Journal of Experimental Biology*, 2016, 219: 3642-3648.
- [14] Westerterp-Plantenga M S, Westerterp K R, Mira R, et al. Appetite at "high altitude" [Operation Everest III (Comex-'97)]: a simulated ascent of Mount Everest[J]. *Journal of Applied Physiology*, 1999, 87(1): 391-399.
- [15] Beker A, Vanhooser S, Swartzlander J, et al. Graded atmospheric oxygen level effects on performance and ascites incidence in broilers[J]. *Poultry Science*, 2003, 82(10): 1550-1553.
- [16] Quintero P, Milagro F I, Campión J, et al. Impact of oxygen availability on body weight management[J]. *Medical Hypotheses*, 2010, 74: 901-907.
- [17] Xiong Y, Lei F M. SLC2A of SLC2 gene family in bird provides functional compensation for the loss of SLC2A4 gene in other vertebrates[J]. *Molecular Biology and Evolution*, 2021, (4): 1276-1291.
- [18] Scherer T, Metz M, Beghini M, et al. A direct effect of the hematocrit on blood glucose: Evidence from hypoxia- and erythropoietin-treated mice[J]. *Science Advances*, 2025, 11(16).
- [19] Bakkeren C, Smith E, York J M, et al. A morphometric analysis of the lungs of high-altitude ducks and geese[J]. *Journal of Anatomy*, 2020, 237(1): 188-196.
- [20] Parr N, Wilkes M, Hawkes L A. Natural Climbers: Insights from Avian Physiology at High Altitude[J]. *High Altitude Medicine and Biology*, 2019, 20(4): 427-437.
- [21] Xiong Y, Hao Y, Cheng Y, et al. Comparative transcriptomic and metabolomic analysis reveals pectoralis highland adaptation across altitudinal songbirds[J]. *Integrative Zoology*, 2022, 17(6): 1162-1178.