



南京林业大学学报(自然科学版)

Journal of Nanjing Forestry University(Natural Sciences Edition)

ISSN 1000-2006,CN 32-1161/S

《南京林业大学学报(自然科学版)》网络首发论文

题目：盐城滨海湿地海堤林柳莺体质量与迁徙时序的关系分析
作者：黄雯怡，刘彬，张银龙，薛丹丹，王莹，王立波，孙孝平
收稿日期：2025-03-29
网络首发日期：2025-12-01
引用格式：黄雯怡，刘彬，张银龙，薛丹丹，王莹，王立波，孙孝平. 盐城滨海湿地海堤林柳莺体质量与迁徙时序的关系分析[J/OL]. 南京林业大学学报(自然科学版). <https://link.cnki.net/urlid/32.1161.S.20251201.1135.002>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

盐城滨海湿地海堤林柳莺体质量与迁徙时序的关系分析

黄雯怡^{1,2}, 刘彬³, 张银龙^{1*}, 薛丹丹³, 王莹³, 王立波³, 孙孝平^{4*}

(1.南京林业大学生态与环境学院, 江苏 南京 210037; 2.南京林业大学外国语学院, 江苏 南京 210037; 3.江苏省大丰麋鹿国家级自然保护区, 江苏 盐城 224136; 4.盐城师范学院湿地学院, 江苏 盐城 224007)

摘要:【目的】盐城滨海湿地是东亚-澳大利西亚候鸟迁徙路线的关键节点, 基于鸟类环志数据, 系统分析了2018-2019年及2021-2023年秋季迁徙期小型雀形目鸟类在盐城湿地的体征动态变化趋势及其种间差异, 揭示其迁徙时序与生理状态的关联机制和在中途停歇地的策略选择, 为小型候鸟迁徙生态学研究提供新的理论依据。【方法】以区域典型优势种柳莺科鸟类——极北柳莺(*Phylloscopus borealis*)、淡脚柳莺(*Phylloscopus tenellipes*)和黄眉柳莺(*Phylloscopus inornatus*)为对象, 通过环志网场在沿海堤林带每隔300 m布设4个网场8张雾网, 记录捕获鸟类体长、体质量等, 使用一般线性模型分析首到日、高峰日、离开日与柳莺体质量的关系。【结果】5年监测期共环志小型雀形目796只个体, 物种间平均体质量存在极显著差异(Kruskal-Wallis检验: $\chi^2=248.145$, $df=2$, $P<0.01$); 基于时间序列的动态分析, 3种鸟类个体体质量均呈下降趋势, 其中黄眉柳莺与淡脚柳莺的下降趋势达极显著水平(广义线性模型: 黄眉柳莺 $R^2=0.2$, $P<0.01$ 。淡脚柳莺 $R^2=0.1$, $P<0.01$); 3种鸟类体质量与种群首到日(50%个体到达日)、高峰日(75%个体到达日)及离开日(90%个体到达日)呈显著负相关。具体表现为体质量越大的个体, 其种群首到日(一般线性模型, generalized linear model, GLM: $R^2=0.85$, $P<0.01$)、高峰日($R^2=0.81$, $P<0.01$)和离开日($R^2=0.71$, $P<0.01$)均显著滞后。【结论】体质量作为鸟类能量储备的直观指标, 显著影响其迁徙时序, 3种柳莺体质量的种间差异显著, 体现了其不同的能量储备策略与生态适应特征, 为理解候鸟迁徙策略的生态适应提供了新的科学依据。

关键词: 盐城滨海湿地; 柳莺; 迁徙策略; 海堤林; 体质量

中图分类号: Q958.15; S763

文献标志码: A

Analysis of the relationship between warbler (*Phylloscopus* spp.) body mass and migration timing in coastal wetland embankment forests of Yancheng

HUANG Wenyi^{1,2#}, LIU Bin^{3#}, ZHANG Yinlong^{1*}, XUE Dandan³, WANG Ying³, WANG Libo³, SUN Xiaoping^{4*}

(1. College of Ecology and Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037; 2. School of Foreign Studies, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 3. Jiangsu Dafeng Milu National Nature Reserve, Yancheng 224136, China; 4. School of Wetland, Yancheng Teachers University, Yancheng 224007, China)

Abstract: 【Objectives】The regulatory mechanism of physical condition on avian migration is one of the research hotspots in current zoology. As a key node of the East Asian-Australasian Flyway (EAAF), the Yancheng Coastal Wetland not only serves as an important migration corridor and stopover site for waterbirds, but also witnesses the passage of a large number of small passerine birds during the spring and autumn migration seasons every year. Based on bird ringing data, this study systematically analyzed the dynamic trends of physical conditions and interspecific differences of small passerine birds during the autumn migration period in Yancheng Wetland from 2018 to 2019 and 2021 to 2023, and further explored the causes of these differences. 【Methods】Taking three typical dominant warbler species in the region—*Phylloscopus borealis* (Arctic Warbler), *Phylloscopus tenellipes* (Pale-legged Leaf Warbler), and *Phylloscopus inornatus* (Yellow-browed Warbler)—as research objects, 4 netting sites with 8 mist nets each were set up every 300 meters in the coastal dyke forest belt through the ringing network. The body length, body mass, and

收稿日期 Received: 2025-03-29

修回日期 Accepted: 2025-11-25

基金项目: 黄海湿地课题项目(第一期) (HHSDKT202313); 国家环境保护生物多样性与生物安全重点实验室开发课题 (STHJBNJS202303)。

第一作者: 黄雯怡, 教授, 负责数据调查与论文修改; 刘彬, 高级工程师, 负责论文修改。*通信作者: 张银龙, 教授, 负责指导试验设计; 孙孝平, 副教授, 负责指导试验开展。

DOI:10.12302/j.issn.1000-2006.202503031。

other parameters of the captured birds were recorded, and the general linear model was used to analyze the relationship between the first arrival date, peak date, departure date, and the body mass of the warblers. 【Results】 A total of 796 individuals were ringed during the 5-year monitoring period, and there were extremely significant differences in average body mass among species (Kruskal-Wallis test: $\chi^2=248.145$, $df=2$, $P<0.01$). Based on time-series dynamic analysis, the body mass of the three bird species all showed a decreasing trend, among which the decreasing trends of *P. inornatus* and *P. tenellipes* were extremely significant (Generalized Linear Model: *P. inornatus* $R^2=0.2$, $P<0.01$; *P. tenellipes* $R^2=0.1$, $P<0.01$). The body mass of the three warbler species was significantly negatively correlated with the first arrival date (date when 50% of the population arrives), peak date (date when 75% of the population arrives), and departure date (date when 90% of the population arrives) of the population. Specifically, individuals with larger body mass had significantly delayed population first arrival date (GLM: $R^2=0.85$, $P<0.01$), peak date ($R^2=0.81$, $P<0.01$), and departure date ($R^2=0.71$, $P<0.01$). 【Conclusions】 As an intuitive indicator of avian energy reserves, body mass significantly affects their migration timing. The significant interspecific differences in body mass among the three warbler species reflect their different energy reserve strategies and ecological adaptation characteristics. The research results provide new scientific evidence for understanding the ecological adaptation of migratory bird migration strategies.

Keywords: Yancheng coastal wetland; warblers (*Phylloscopus* spp.); migration strategy; seawall forest; body mass

鸟类迁徙是生物对环境适应性进化的典型范例,每年数以万计的候鸟在繁殖地与越冬地之间进行跨洲际长距离迁徙,部分物种的飞行距离可达上万千米^[1-2]。在这一复杂的生态过程中,鸟类需消耗大量能量,因此需要通过动态调节行为模式、生理机能和身体状况,遵循特定的迁徙时序,并优化中途停歇策略,以完成整个生活史^[3-4]。现有研究表明,候鸟迁徙是内外部因素协同作用的生理过程,外部环境因子如纬度梯度、气温变化、风速风向和降水模式^[5-7],与内部生物学特征如能量储备、性别差异、年龄结构及体质量变化^[8-9],共同塑造了鸟类的迁徙策略。当前关于鸟类迁徙影响因素的研究,多集中于全球气候变化、地理纬度和环境湿度等外部环境变量。然而,内部生物学因素在迁徙决策中的关键作用不容忽视。其中,体质量作为反映鸟类能量储备和身体状况的核心指标,被认为是调控候鸟迁徙策略的重要因子^[10-12]。鸟类在迁徙前通过脂肪沉积积累飞行所需能量,且脂肪代谢产生的代谢水可满足部分水分需求。例如,水蒲苇莺(*Acrocephalus schoenobaenus*)在迁徙期间体质量可从11克增至22克,其额外积累的脂肪能支持约100h的连续飞行^[12]。这种能量储备不仅提升了鸟类的飞行耐力,更直接影响其迁徙时间决策,通过调节生理代谢速率、行为活动模式以及器官形态变化,最终作用于迁徙时序^[6]。值得注意的是,现有研究多聚焦于重点保护物种和大型鸟类^[13-18],如鸫鹛类候鸟为保障繁殖成功率,在春季会提前从越冬地启程,利用其较强的低温耐受性缩短迁徙周期,以延长繁殖投入^[19-20]。相比之下,体质量较小的雀形目鸟类因能量储备有限,面临更高的迁徙风险,且需通过更远距离的迁徙寻找适宜生境,但该类群体征状态对迁徙策略的影响机制仍缺乏系统性研究^[21-26]。

柳莺属(*Phylloscopus*)鸟类作为典型小型雀形目鸣禽,体长普遍不足15cm,与大型水鸟或研究热点物种[如盐城湿地的丹顶鹤(*Grus japonensis*)]形成显著体型差异。该属物种分布广泛,多数具有长距离迁徙习性,其繁殖地涵盖中国东北、西伯利亚至北极圈地区,如叽喳柳莺(*Phylloscopus collybita*)的迁徙距离可达13000km,越冬地则延伸至中国南部、中南半岛及东南亚菲律宾、印度尼西亚等地^[27-28]。尽管现有研究已对柳莺的迁徙路径、中途停歇生态、节律变化及环境响应开展了系统探讨^[29-34],但对其生物学特征与迁徙策略的关联机制仍存在认知空白。鉴于小型鸟类通常采用“跳跃式”迁徙模式,需频繁在中途停歇地补充能量^[4,6,23],而体质量作为能量储备的直观指标,其动态变化对迁徙时序的调控作用亟待深

入探究。盐城滨海湿地作为东亚-澳大利西亚候鸟迁飞路线(EAAF)的关键节点,是候鸟重要的中途停歇地、能量补给站和生态廊道,在保障候鸟种群延续中发挥不可替代的作用^[2,4]。其中,湿地沿岸的海堤林带毗邻潮间带滩涂,为柳莺提供了昆虫和小型无脊椎动物等食物资源,成为其春秋季节迁徙的重要生态通道和中途停歇地,其中极北柳莺(*Phylloscopus borealis*)、黄眉柳莺(*Phylloscopus inornatus*)和淡脚柳莺(*Phylloscopus tenellipes*)是盐城湿地柳莺属的典型代表,极北柳莺繁殖地位于西伯利亚及我国东北,通常于8月末至9月初开始秋季迁徙,10月中旬前后为迁徙高峰,10月末基本完成过境;黄眉柳莺繁殖地在欧亚大陆北部,秋季迁徙启动于9月上旬,迁徙高峰集中在9月末至11月初,10月末至11月初陆续离开中途停歇地;淡脚柳莺繁殖于西伯利亚东部,秋季迁徙始于9月上旬,高峰出现在9月中下旬,10月末结束迁徙活动。本研究以盐城海堤林捕获的极北柳莺、淡脚柳莺和黄眉柳莺为研究对象,通过分析体质量与迁徙时序的定量关系,揭示其迁徙时序与生理状态的关联机制和在中途停歇地的策略选择机制,以期小型候鸟迁徙生态学研究提供新的理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究地概况

本研究区域位于江苏省大丰麋鹿国家级自然保护区(120° 47' ~120° 53' E, 32° 59' ~33° 03' N),地处盐城湿地南侧的南黄海湿地生态系统核心区,主要保护对象为麋鹿(*Elaphurus davidianus*)及其栖息的滨海湿地生态系统。该区域处于北亚热带向暖温带的气候过渡带,光热资源充沛、无霜期长(年均 217 d)、水热条件匹配良好,年平均气温 14.1℃,日照时长 2267.4 h,年均降水量 1068 mm(降水集中于6—9月)^[4]。自2019年黄(渤)海候鸟栖息地列入世界自然遗产名录后,区域实施严格的生态保护政策,为候鸟迁徙提供了稳定的生态空间。保护区内的海堤林带始建于20世纪50年代,作为防风固堤的人工生态屏障,主要植被组成为刺槐(*Robinia pseudoacacia*),并伴生女贞(*Ligustrum lucidum*)、水杉(*Metasequoia glyptostroboides*)等乔木。该林带毗邻潮间带滩涂湿地,形成了独特的林-滩复合生态系统:林冠层为柳莺提供隐蔽栖息场所,林下灌丛与地面层生长的草本植物吸引大量昆虫类群,而滩涂湿地则孕育着丰富的小型无脊椎动物,共同构成了柳莺迁徙途中理想的能量补给与停歇生境。自2018年起,保护区管理局在西侧海堤林带开展系统性雀形目鸟类环志工作,为本研究提供了长期数据支撑。

1.2 研究方法

环志网场布设:在江苏省林业局许可下,于2018—2019年及2021—2023年秋季迁徙期(8月下旬至10月底),沿海堤林带每隔300 m设置标准化网场,共计4个网场8张雾网。雾网采用高强度尼龙单丝线编织而成,具备良好的柔韧性与隐蔽性,可减少鸟类撞击损伤。单网规格遵循国际标准[12 m(长)×2.6 m(高),网眼36 mm²,下纲距地面0.1 m],采用垂直于海堤走向的双排并列式布局以优化捕获效率。监测时段优先选择气象条件稳定的无风向阳日开展工作。在微风(风速1~3 m/s)天气下,雾网的正常展开与捕获功能基本不受影响;若遇小雨天气,为避免鸟类因羽毛湿润增加应激风险,仅在短暂雨歇时段快速巡网并及时处理落网个体,同时记录天气变化情况。每日6:00—17:00进行连续监测,每小时开展1次巡网作业,确保及时处理落网鸟类,降低应激影响。网场位置与布设方式在各监测年度保持一致,以控制环境变量对数据采集的干扰。

体征测量与数据采集:捕获个体后,即刻记录物种名称、网场编号及入网时间,经鸟袋暂存后转运至环志站进行标准化测量。采用精度0.1 g的电子天平测定体质量,运用最大翅长测量法(误差±0.1 cm)获取翅长数据,并记录体长指标(cm)。所有测量遵循特定管理规范和技术标准执行^[35],测量完成后为个体佩戴唯一编码金属环志并立即放归。本研究聚焦物种整体特征,暂不区分亚种间形态差异。

1.3 数据处理

时间序列构建与物候参数定义：以历年最早捕获日期（8月24日）作为秋季迁徙时序起点，依次建立连续时间序列。基于捕获数据，分别计算各物种种群达到总捕获量50%、75%和90%的日期，定义为首到日（arrival date）、高峰日（peak date）和离开日（depart date），并统计对应时段的平均体质量指标^[4]。

统计分析方法：采用 R 4.2.1 软件进行所有统计分析。首先，运用 Kolmogorov - Smirnov 检验（K - S test）对 3 种柳莺的体质量数据进行正态性检验，结果显示数据不符合正态分布（ $P < 0.01$ ）。尝试通过对数转换、平方根转换等常见的数据转换方法对原始数据进行处理后，再次进行正态性检验，数据仍未满足参数检验条件。因此，采用非参数 Kruskal - Wallis 检验（K - W test）分析 3 种柳莺体质量大小的差异性，该检验可有效处理非正态分布数据，通过比较多个独立样本的秩次分布判断组间差异。为进一步明确物种间体质量差异的具体情况，使用事后成对比较方法，并经 Bonferroni 校正显著性水平，Bonferroni 校正通过调整多重比较的显著性阈值（将 α 值除以比较次数），有效控制了多重比较带来的 I 型错误膨胀问题^[36]。采用一般线性模型（generalized linear model, GLM）分析柳莺首到日、高峰日、离开日与相应各时间段柳莺体质量的关系。在构建 GLM 模型时，根据响应变量（首到日、高峰日、离开日）的特征，选择合适的误差分布和连接函数。例如，对于日期类型的响应变量，将其视为连续变量，并选择高斯分布和恒等连接函数，以量化体质量与迁徙物候参数之间的线性相关性。数据以“平均值 \pm 标准误差”形式表示，显著性水平设为 $\alpha = 0.05$ （显著）与 $\alpha = 0.01$ （极显著）双阈值标准^[36]。

2 结果与分析

2.1 盐城滨海湿地海堤林柳莺体质量变化特征

研究期间共捕获极北柳莺、黄眉柳莺和淡脚柳莺 796 只，其中极北柳莺占比 58%（463 只），黄眉柳莺占比 19%（151 只），淡脚柳莺占比 23%（182 只）。Kruskal-Wallis 检验显示，3 种柳莺平均体质量存在极显著差异（ $\chi^2 = 248.145$, $df = 2$, $P < 0.01$ ）。黄眉柳莺平均体质量（ 6.06 ± 0.11 g）显著低于极北柳莺（ 9.01 ± 0.06 g）和淡脚柳莺（ 9.11 ± 0.07 g）（ $P < 0.01$ ）；极北柳莺与淡脚柳莺体质量差异不显著。

各物种体质量分布特征如下：极北柳莺体质量集中于 8~10 g（占比 63.3%），7 g 以下和 10 g 以上个体分别占 1.9% 和 15.8%；黄眉柳莺以 5~7 g 个体为主（65.6%），5 g 以下和 7 g 以上个体占比 5.3% 和 29.1%；淡脚柳莺 8~10 g 个体占比达 82.4%，8 g 以下和 10 g 以上个体分别占 6.6% 和 11.0%（图 1）。该体质量差异为后续分析不同物种迁徙时序策略提供基础数据支撑。

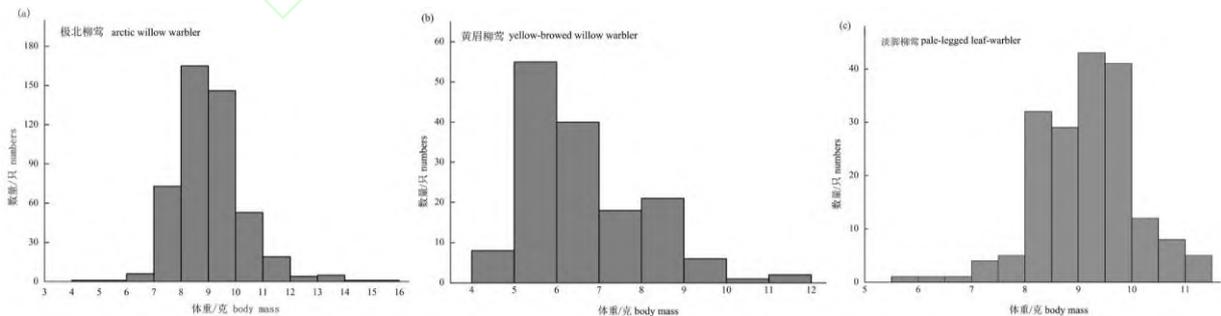


图 1 盐城海堤林秋季 3 种柳莺鸟类体质量的频数分布

Fig.1 Frequency distribution of body mass of 3 warblers in autumn season in Yancheng seawall forest

2.2 盐城滨海湿地海堤林秋季柳莺体质量动态变化

本研究聚焦于秋季迁徙期，鉴于春季柳莺迁徙时间短暂，且捕获样本量极为有限，难以

开展系统分析，故未将春季数据纳入研究范畴。基于 2018—2019 年及 2021—2023 年秋季监测数据，3 种柳莺个体体质量均呈下降趋势。广义线性模型（GLM）分析显示，黄眉柳莺体质量与迁徙时间呈极显著负相关 ($R^2=0.2, P<0.01$)，淡脚柳莺呈现相似显著趋势 ($R^2=0.1, P<0.01$)，即早期抵达个体体质量显著高于后期个体，表明在秋季迁徙进程中，黄眉柳莺和淡脚柳莺抵达研究地的时间越早，其体质量越大；反之，抵达时间越晚，体质量越小。这种现象可能暗示，在迁徙前期，黄眉柳莺和淡脚柳莺所途经的区域食物资源更为丰富且优质，使其能够充分觅食，积累足够的能量储备，从而表现为体质量较大；随着时间推移，食物资源分布格局改变，加之竞争加剧，导致后期抵达的个体难以获取充足食物，无法积累足够体质量。极北柳莺虽表现出体质量下降趋势，但相关性未达显著水平 ($R^2=0.02, P>0.05$)。（图 2）。

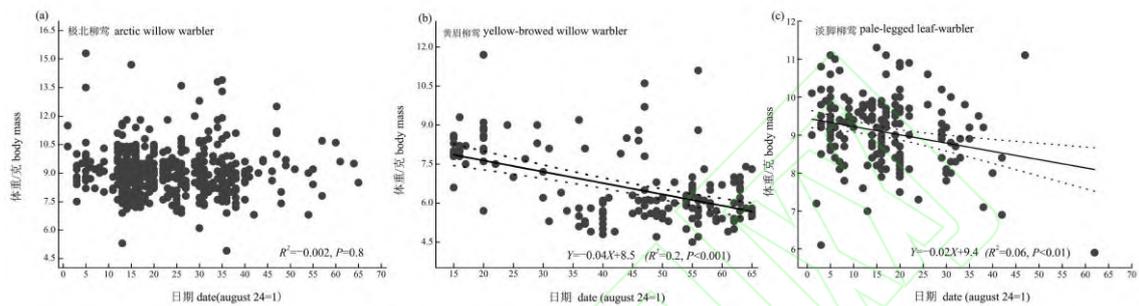


图 2 盐城海堤林秋季 3 种柳莺鸟类体质量随迁徙时间的变化（虚线表示 95%置信区间）

Fig.2 Body mass of 3 warblers in autumn in different years in Yancheng seawall forest

2.3 盐城滨海湿地海堤林柳莺体质量与迁徙时序的关联性

基于 2018—2019 年及 2021—2023 年秋季监测数据，通过广义线性模型（GLM）分析发现，极北柳莺、黄眉柳莺和淡脚柳莺的种群平均体质量与迁徙时序关键节点（首到日、高峰日、离开日）均呈现显著负相关关系 ($P<0.01$)。具体表现为：体质量越大的种群，其首到日 ($R^2=0.85$)、高峰日 ($R^2=0.81$) 及离开日 ($R^2=0.71$) 显著延迟（图 3）。

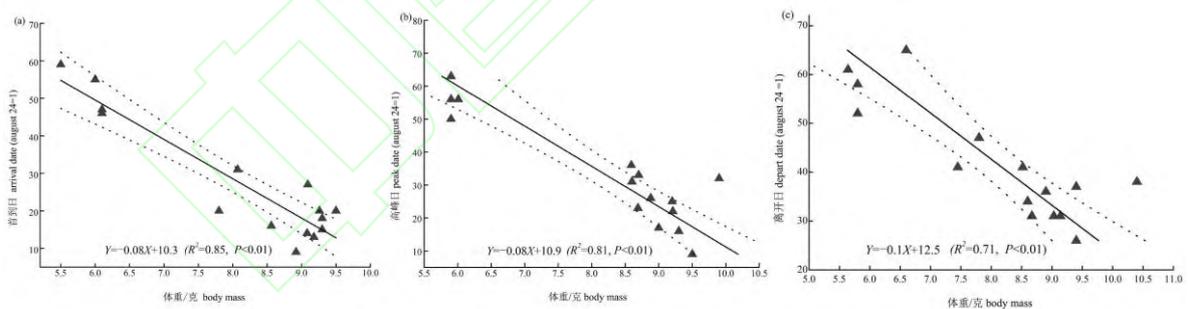


图 3 盐城海堤林秋季 3 种柳莺鸟类体质量随迁徙时间的变化（虚线表示 95%置信区间）

Fig.3 Effect of body mass on warbler migration patterns in autumn in Yancheng seawall forest

在种群首到日方面，GLM 结果显示，3 种柳莺平均体质量每增加 1 g，其种群首到日分别延迟 3.2~4.5 天 ($P<0.01$)。这一现象表明，体质量较大的个体在前期栖息地积累了更充足的能量储备。凭借其能量优势，该类个体可在原栖息地延长停留时间，充分利用当地资源，直至气候条件、食物可获性等环境因素触发迁徙决策，进而导致种群整体首到日滞后。例如，在能量储备充足的情况下，柳莺可能选择等待更适宜的风向条件，以降低飞行能耗。种群迁徙高峰日同样呈现类似规律。当种群中高体质量个体占比增加时，其迁徙高峰显著推迟。这可能归因于体质量较大个体具有更强的飞行耐力与更高效能量利用效率，使其倾向于选择较晚的时间集中迁徙。此类个体的行为模式对种群内其他个体产生聚集效应，从而带

动整个种群的迁徙高峰向后推移。数据显示,平均体质量每增加 1 g,种群高峰日延迟 2.8~3.9 天 ($P<0.01$)。在种群离开日方面,体质量与离开时间的负相关性同样显著。体质量较大的个体凭借更强的资源竞争能力,在盐城海堤林内能够获取更多食物及生存资源,进而维持良好的身体状态,无需过早离开寻找新栖息地。相比之下,体质量较小的个体因资源获取受限,被迫提前启程,从而导致体质量与种群离开日呈显著负相关(平均体质量每增加 1 g,离开日延迟 2.1~3.0 天, $P<0.01$)。值得注意的是,尽管整体趋势显著,但个别年份因气候异常(如突发强风、降雨)或食物资源波动,可能导致部分种群离开日出现偏离,体现了环境因素对迁徙决策的复杂影响。

3 讨论

鸟类迁徙策略的选择是权衡能量消耗、时间效率与捕食风险的适应性结果,其中时间最小化与能量最小化是两类核心策略^[6,37-38]。本研究发现盐城海堤林秋季迁徙的极北柳莺、黄眉柳莺和淡脚柳莺采用“跳跃式”迁徙模式,体现出时间最小化策略特征,这一模式与其迁徙过程中的能量管理和时序调控密切相关^[4]。本研究揭示的 3 种柳莺体质量特征与迁徙时序的内在联系,反映了物种特有的生态适应策略。3 种柳莺体质量的显著种间差异,印证了不同物种在能量储备策略上的分化,其中黄眉柳莺的体型特征可能与其独特的能量代谢模式相关,而极北柳莺与淡脚柳莺相近的体质量则暗示二者生态位存在一定重叠,这与同域迁徙鸟类的生态分化规律相契合。部分柳莺体质量随迁徙时间的变化趋势,凸显了迁徙时序对能量储备的调控作用。黄眉柳莺和淡脚柳莺体质量随迁徙时间显著下降,以及极北柳莺类似的下降态势,本质上是迁徙过程中资源获取与消耗动态平衡的体现。早期迁徙个体得益于更优的资源条件积累充足能量,而后期个体面临的资源竞争加剧可能导致能量储备不足,这一现象在小型迁徙鸣禽中具有普遍性^[4]。极北柳莺体质量与迁徙时间相关性不显著的结果,提示其可能存在特殊的迁徙行为或生理调节机制,或受样本偏差等因素干扰,需后续研究进一步验证^[6]。

体质量与迁徙时序的负相关关系,为迁徙敏感性假说与繁殖能量投入假说提供了实证支持。体质量较大个体凭借更强的环境适应性延迟离开繁殖地,同时因繁殖期能量投入较高导致迁徙启动较晚,最终表现为抵达停歇地的时间滞后。这一机制解释了迁徙种群中体质量梯度与时序差异的关联,丰富了对小型鸣禽迁徙决策机制的认知^[25,37]。迁徙过程中的生存风险差异可能进一步放大体质量对迁徙成效的影响。结合已有研究中成年鸟类较幼鸟更早抵达目的地的规律^[6-9],推测本研究中体质量较轻的晚到个体可能包含较高比例的亚成体。这类个体因能量储备不足和迁徙经验匮乏,在长距离飞行及停歇补给中面临更高的能量耗竭和捕食风险,这一筛选效应可能影响种群迁徙成功率与越冬存活率^[26,30-33]。从种群动态视角看,体质量相关的生存风险差异可能塑造种群结构与适应性策略。在极端气候事件或食物资源波动时,体质量较轻个体更高的死亡率可能驱动种群调整迁徙策略,如提前迁徙时间或优化停歇地选择。长期来看,气候变化导致的食物资源时空分布改变,可能加剧体质量较轻个体生存压力,进而影响种群地理分布与数量动态,这与迁徙鸟类对气候胁迫的适应性响应模式一致。

本研究受限于传统环志技术,未能对柳莺进行性别与年龄精准鉴定,这可能混淆体质量与其他因素对迁徙策略的影响。未来研究可结合分子生物学技术(如线粒体 DNA 分析)与羽毛微观结构特征(如羽片磨损程度、色素沉积差异),建立非损伤性的性别与年龄鉴定体系。同时,通过稳定同位素分析追踪个体的食物来源与能量代谢,结合卫星追踪技术获取实时迁徙路径,将有助于解析年龄、性别、体质量等多因素交互作用下的柳莺迁徙策略,为候鸟保护提供更精准的科学依据。

致谢:感谢盐城市湿地和世界自然遗产保护管理中心在项目资金上给予的支持,感谢张亚楠、周晨曦、杜进进、吴亚钊、奚苏堂、叶明智等人在野外环志工作给予帮助!

参考文献:

- [1] 林远锋, 鲁长虎, 许鹏, 等. 1976 年以来丹顶鹤在我国的分布变迁及就地保护状况[J]. 南京林业大学学报(自然科学版). 2021, 45(6): 200-208. LIN Y F, LU C H, XU P, et al. Distribution changes and in situ conservation of red-crowned cranes (*Grus japonensis*) in China since 1976[J]. J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed). 2021, 45(6): 200-208. DOI: 10. 12302/j. issn. 1000-2006. 202012013.
- [2] SUN X P, SHEN J M, XIAO Y, et al. Habitat suitability and potential biological corridors for waterbirds in Yancheng coastal wetland of China[J]. Ecol Indic, 2023, 148: 110090. DOI: 10. 1016/j. ecolind. 2023. 110090.
- [3] 曹牧, 汤臣栋, 马强, 等. 崇明东滩鸟类国家级自然保护区环志鸟类种群特征年际变化[J]. 南京林业大学学报(自然科学版). 2017, 41(01): 15-20. CAO M, TANG C D, MA Q, et al. Inter-annual population variation of migratory birds in Chongming Dongtan National Nature Reserve[J]. J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed). 2017, 41(01): 15-20. DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-2006. 2017. 01. 003.
- [4] 刘彬, 安玉亭, 薛丹丹, 等. 盐城沿海海堤林带柳莺属(*Phylloscopus*)鸟类秋季迁徙规律[J]. 生态学报, 2021, 41(19): 7870-7878. LIU B, AN Y T, XUE D D, et al. Migration of warblers (*Phylloscopus*) along Yancheng seawall forest belt in autumn[J]. Acta Ecol Sin, 2021, 41(19): 7870-7878. DOI: 10. 5846/stxb202006141545.
- [5] HAEST B, HÜPPOP O, VAN DE POL M, et al. Autumn bird migration phenology: a potpourri of wind, precipitation and temperature effects[J]. Global Change Biol, 2019, 25(12): 4064-4080. DOI: 10. 1111/gcb. 14746.
- [6] WANG X D, SOMVEILLE M, DOKTER A M, et al. Macro-scale relationship between body mass and timing of bird migration[J]. Nat Commun, 2024, 15: 4111. DOI: 10. 1038/s41467-024-48248-7.
- [7] HORTON K G, BULER J J, ANDERSON S J, et al. Artificial light at night is a top predictor of bird migration stopover density[J]. Nat Commun, 2023, 14: 7446. DOI: 10. 1038/s41467-023-43046-z.
- [8] SCHMALJOHANN H, EIKENAAR C. How do energy stores and changes in these affect departure decisions by migratory birds? A critical view on stopover ecology studies and some future perspectives[J]. J Comp Physiol A, 2017, 203(6): 411-429. DOI: 10. 1007/s00359-017-1166-8.
- [9] CHO S Y, NAM H Y, PARK S Y, et al. Sexual dimorphism and sex-differential migration of Little Buntings (*Emberiza pusilla*) at an East Asian stopover site[J]. Avian Res, 2022, 13: 100014. DOI: 10. 1016/j. avrs. 2022. 100014.
- [10] SOCKMAN K W, HURLBERT A H. How the effects of latitude on daylight availability may have influenced the evolution of migration and photoperiodism[J]. Funct Ecol, 2020, 34(9): 1752-1766. DOI: 10. 1111/1365-2435. 13578.
- [11] CONKLIN J R, BATTLE P F, POTTER M A, et al. Breeding latitude drives individual schedules in a trans-hemispheric migrant bird[J]. Nat Commun, 2010, 1: 67. DOI: 10. 1038/ncomms1072.
- [12] FINCH T, BUTLER S J, FRANCO A M A, et al. Low migratory connectivity is common in long-distance migrant birds[J]. J Anim Ecol, 2017, 86(3): 662-673. DOI: 10. 1111/1365-2656. 12635.
- [13] BORDER J A, PEARCE-HIGGINS J W, HEWSON C M, et al. Expanding protected area coverage for migratory birds could improve long-term population trends[J]. Nat Commun, 2025, 16: 1813. DOI: 10. 1038/s41467-025-57019-x.
- [14] SCHMALJOHANN H. Proximate mechanisms affecting seasonal differences in migration speed of avian species[J]. Sci Rep-UK, 2018, 8: 4106. DOI: 10. 1038/s41598-018-22421-7.
- [15] 刘俊, 黄莉, 孙晓倩, 等. 气候变化对中国观鸟旅游的影响: 基于鸟类物候变化的分析[J]. 地理学报, 2019, 74(5): 912-922. LIU J, HUANG L, SUN X Q, et al. Impact of climate change on birdwatching tourism in China: based on the perspective of bird phenology[J]. Acta Geogr Sin, 2019, 74(5): 912-922. DOI: 10. 11821/dlxb201905006.
- [16] 任诗超, 张银龙, 曹铭昌, 等. 成都市鸟类多样性时空分布格局及热点区域识别[J]. 南京林业大学学报(自然科学版). 2024, 48(5): 189-196. REN S C, ZHANG Y L, CAO M C, et al. The bird diversity spatial and temporal distribution patterns and its hotspot areas identification in Chengdu City[J]. J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed). 202439, 48(5): 189-196. DOI:10.12302/j.issn.1000-2006.202212039.
- [17] XIONG Y, FAN L Q, CHANG Y B, et al. Warm temperature is associated with reduced body mass and diversification rates while increasing extinction risks in cold-adapted seabirds[J]. Global Change Biol, 2024, 30(12): e70000. DOI: 10. 1111/gcb. 70000.
- [18] HAASE I, LIU Z W, ZHANG S, et al. Altitudinal migration behavior patterns of birds on the eastern slope of Mt. Gongga, China[J]. Avian Res, 2023, 14: 100114. DOI: 10. 1016/j. avrs. 2023. 100114.
- [19] WATANABE Y Y. Flight mode affects allometry of migration range in birds[J]. Ecol Lett, 2016, 19(8): 907-914. DOI: 10. 1111/ele. 12627.
- [20] FORTI M, MONRÓS J S, VERA P. Habitat and weather conditions effects on long-term breeding population dynamics of five species of herons (Ardeidae) and Glossy Ibis (Threskiornithidae) in the Valencian Community, Spain[J]. Limnetica, 2021, 40(2): 417-433. DOI: 10. 23818/limn. 40. 28.

- [21] 吴颢林, 张强, 汪慧琳, 等. 基于卫星跟踪的青脚鹬迁徙路线[J]. 动物学杂志, 2024, 59(5): 707-713. WU H L, ZHANG Q, WANG H L, et al. Satellite tracking the migration of common greenshank in China[J]. Chin J Zool. , 2024, 59(5): 707-713. DOI: 10. 13859/j. cjz. 202422331.
- [22] 李思梦, 赵筱涛, 徐沛卓, 等. 基于卫星追踪的燕隼秋季迁徙路线及中途停歇地的研究[J]. 野生动物学报, 2025, 46(2): 336-346. LI S M, ZHAO X T, XU P Z, et al. The study on the autumn migration routes and stopover sites of Eurasian hobby based on satellite tracking[J]. Chin J Wildl, 2025, 46(2): 336-346. DOI: 10. 12375/ysdwx. 20250211.
- [23] 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[J]. 生态学报, 2005, 25(11): 3067-3075. MA Z J, WANG Y, CHEN J K. Physiological ecology of migratory birds during the stopover periods[J]. Acta Ecol Sin, 2005, 25(11): 3067-3075. DOI: 10. 3321/j. issn: 1000-0933. 2005. 11. 038.
- [24] COOPER N W, SHERRY T W, MARRA P P. Experimental reduction of winter food decreases body condition and delays migration in a long-distance migratory bird[J]. Ecology, 2015, 96(7): 1933-1942. DOI: 10. 1890/14-1365. 1.
- [25] COPPACK T, TINDEMANS I, CZISCH M, et al. Can long-distance migratory birds adjust to the advancement of spring by shortening migration distance? The response of the pied flycatcher to latitudinal photoperiodic variation[J]. Global Change Biol, 2008, 14(11): 2516-2522. DOI: 10. 1111/j. 1365-2486. 2008. 01668. x.
- [26] HARNOS A, LANG Z, FEHÉRVÁRI P, et al. Sex and age dependent migration phenology of the Pied Flycatcher in a stopover site in the Carpathian Basin[J]. Ornis Hungarica, 2015, 23(2): 10-19. DOI: 10. 1515/orhu-2015-0010.
- [27] BOZÓ L, ANISIMOV Y, HEIM W. Differences in migration phenology of warblers at two stopover sites in eastern *Russia* suggest a longitudinal migration pattern[J]. Avian Res, 2023, 14: 100076. DOI: 10. 1016/j. avrs. 2023. 100076.
- [28] HEIM W, HEIM R J, BEERMANN I, et al. Using geolocator tracking data and ringing archives to validate citizen-science based seasonal predictions of bird distribution in a data-poor region[J]. Glob Ecol Conser, 2020, 24: e01215. DOI: 10. 1016/j. gecco. 2020. e01215.
- [29] MACHUSKO M, ROTHSTEIN D E, BLEISCH A D. Management of tree density to sustain Kirtland' s warbler breeding habitat and timber production from jack pine plantations[J]. Forest Ecol Manag, 2024, 566: 122097. DOI: 10. 1016/j. foreco. 2024. 122097.
- [30] RHINEHART T A, MCNEIL D J, FISS C J, et al. Benefits of Golden-winged Warbler and Cerulean Warbler habitat restoration for non-target forest birds: an empirical examination of the focal species concept[J]. Biol Conserv, 2024, 292: 110436. DOI: 10. 1016/j. biocon. 2023. 110436.
- [31] YAN H L, ZHAO H H, LUO H X, et al. Oriental Reed Warblers do not abandon Common Cuckoo chicks during prolonged nestling periods[J]. Avian Res, 2024, 15: 100190. DOI: 10. 1016/j. avrs. 2024. 100190.
- [32] MÉRŐ T O, ŽULJEVIĆ A, LENGYEL S. Timing of reed management affects habitat use and breeding success in Great Reed Warblers: a field experiment on agricultural drainage canals[J]. Glob Ecol Conser, 2023, 48: e02691. DOI: 10. 1016/j. gecco. 2023. e02691.
- [33] WANG H S, MA L K, WANG J J, et al. Modulation of dear enemy effects by male dusky warblers (*Phylloscopus fuscatus*) at different reproductive stages[J]. Behav Process, 2022, 200: 104706. DOI: 10. 1016/j. bproc. 2022. 104706.
- [34] SHEN C, YU J P, LU H L, et al. Warblers perform less nest defense behavior and alarm calls to human intruders : a result of habituation[J]. Glob Ecol Conser, 2020, 23 : e01187 . DOI : 10. 1016/j. gecco. 2020. e01187.
- [35] 国家林业局. 国家林业局关于印发《鸟类环志管理办法(试行)》和《鸟类环志技术规程(试行)》的通知(林护发(2002)33号)[EB/OL. (2002-02) . [https://www. forestry. gov. cn/main/5925/20200414/090421504067334. html](https://www.forestry.gov.cn/main/5925/20200414/090421504067334.html).
- [36] CARDOT H, SARDA P. Estimation in generalized linear models for functional data via penalized likelihood[J]. J Multivariate Anal, 2005, 92(1): 24-41. DOI: 10. 1016/j. jmva. 2003. 08. 008.
- [37] 彭波, 苏旭芳, 李宏姣, 等. 基于气流轨迹的广西秋季候鸟迁徙通道划分研究[J]. 环境科学与管理, 2024, 49(8): 145-150. PENG B, SU X F, LI H J, et al. Study on the division of migration routes of autumn migratory birds in Guangxi based on airflow trajectories[J]. Environ Sci Manag, 2024, 49(8): 145-150. DOI: 10. 3969/j. issn. 1673-1212. 2024. 08. 033.
- [38] ZHAO M J, CHRISTIE M, COLEMAN J, et al. Time versus energy minimization migration strategy varies with body size and season in long-distance migratory shorebirds[J]. Mov Ecol, 2017, 5: 23. DOI: 10. 1186/s40462-017-0114-0.