

# 鸟击风险的模型评估以及鸟击防范 ——以兰州中川国际机场为例

熊能<sup>①②</sup> 第伍军<sup>③</sup> 王凯韬<sup>④</sup> 闫东<sup>①②</sup> 樊臻<sup>①</sup> 沈正儒<sup>①</sup> 赵伟<sup>①②\*</sup>

① 兰州大学生命科学学院 兰州 730000; ② 甘肃省环境生物监测与修复重点实验室 兰州 730000;

③ 兰州中川国际机场 兰州 730030; ④ 兰州大学萃英学院 兰州 730000

**摘要:** 鸟情调研和鸟击风险评估对机场鸟击防范和管理具有重要意义。鸟类的季节性活动,如迁徙和繁殖,会导致鸟类群落发生显著变化,进而使得机场的高风险鸟种呈现时间差异。然而,大多数研究仅依据全年的鸟类多样性数据评估鸟击风险,而忽略了季节性变化,不利于对机场鸟击防治进行科学指导。为此,本研究于2023年3月至2024年2月通过样线法和样点法对兰州中川国际机场的鸟情进行逐月调查,并采用权重加和模型和风险矩阵模型进行鸟击风险评估。结果显示,兰州中川国际机场周边分布有鸟类19目30科187种;4月份鸟种数最多,10月记录鸟类个体数最多;全年有41种鸟至少一个月被一个模型评为鸟击高危鸟种;权重加和模型识别到各月鸟击高危鸟种( $7.7 \pm 1.8$ )种,风险矩阵模型识别到各月高危鸟种( $9.7 \pm 3.8$ )种;高危鸟种数全年随月份呈“双峰”的趋势,4月和10月高危鸟种相对较多;从生境看,湿地生境几乎全年高危鸟种数最多,鸟击风险最大。本研究指出了兰州中川国际机场在不同月份和生境下鸟击防范工作的重点,为该机场的鸟击防范工作提供了科学依据。

**关键词:** 鸟击风险评估; 兰州中川国际机场; 鸟类群落结构变化; 权重加和模型; 风险矩阵模型

中图分类号: Q958 文献标识码: A 文章编号: 0250-3263 (2025) 05-663-10

## Bird Strike Risk Assessment and Prevention: A Case Study at Lanzhou Zhongchuan International Airport

XIONG Neng<sup>①②</sup> DI Wu-Jun<sup>③</sup> WANG Kai-Tao<sup>④</sup> YAN Dong<sup>①②</sup> FAN Zhen<sup>①</sup>  
SHEN Zheng-Ru<sup>①</sup> ZHAO Wei<sup>①②\*</sup>

① School of Life Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000; ② Key Laboratory of Biomonitoring and Bioremediation for Environment Pollution, Gansu Province, Lanzhou 730000; ③ Lanzhou Zhongchuan International Airport, Lanzhou 730030; ④ Cuiying Honors College, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

**Abstract: [Objectives]** Bird strike not only causes serious casualties and economic losses but also greatly affects the population of birds. Bird surveys and bird strike risk assessment are of great significance for bird

**基金项目** 甘肃省科技计划项目(No. 2022JR5RA469);

\* 通讯作者, E-mail: zhaowei@lzu.edu.cn;

**第一作者介绍** 熊能,男,硕士研究生;研究方向:动物生态学;E-mail: xiongn2024@lzu.edu.cn。

收稿日期: 2024-03-26, 修回日期: 2025-03-25 DOI: 10.13859/j.cjz.202524065 CSTR: 32109.14.cjz.24065

strike prevention and management at airports. Seasonal activities of birds, such as migration and breeding, can lead to significant changes in bird communities, resulting in time variations of high-risk bird species at airports. However, most studies only assess bird strike risks based on year-round avian diversity data, ignoring seasonal variations, which is not conducive to providing scientific guidance for airport bird strike prevention and control. In this case, a year-long monthly survey was conducted at Lanzhou Zhongchuan International Airport, and a weighted additive model and a risk matrix model were used to assess the bird strike risk around the airport, with a view to pointing out the focus of bird strike prevention in different months and habitats and providing a theoretical basis for bird strike prevention at the airport. **[Methods]** A monthly survey of birds at Lanzhou Zhongchuan International Airport was conducted via sample line and point methods from March 2023 to February 2024. A total of 12 lines and 5 points were set up (Fig. 1), with each line or point surveyed twice a month in spring and autumn and once a month in winter and summer. The distance sampling method was employed to estimate the monthly density of high-risk species through the Distance package in R 4.3.1. A weighted additive model and a risk matrix model were adopted to assess bird strike risk at the airport each month (Table 1). A modified community similarity index named model similarity index was used to measure the similarity of the results of the two models. Data analyses were conducted in Excel 2023 and Origin 2021. **[Results]** There were 187 species of birds (including *Columba livia domestica*) distributed around Lanzhou Zhongchuan International Airport, belonging to 19 orders and 30 families (Electronic appendix 1). The highest number of species was recorded in April, with a total of 120 species, and the highest number of bird individuals was recorded in October, reaching 5 043. Forty-one bird species were identified as high-risk at least by one model at one month, with Accipitridae (12 species, 29.27%) being the most numerous in terms of taxonomy and resident birds (18 species, 19.51%) being the most numerous in terms of residence type (Electronic appendix 1). From a temporal perspective, the weighted additive model identified an average of  $7.7 \pm 1.8$  high-risk bird species each month, with the highest number (11) in October and the lowest number (5) in July. The risk matrix model identified an average of  $9.7 \pm 3.8$  high-risk bird species each month, with the highest number (18) in April and the lowest number (5) in July. The high-risk bird species identified by the two models were the most similar in March, with a model similarity index of 0.923, and the greatest difference occurred in December and January, with a model similarity index of 0.500. Generally, the bird species density was higher in winter and lower in summer (Electronic appendices 2 - 3). According to the temporal characteristics of the occurrence of high-risk bird species around Zhongchuan Airport, they can be categorized into the following four groups: bird species of focus throughout the year, bird species of focus during the breeding season, bird species of focus during the migratory season, and bird species of focus during winter, and precautions should be taken according to the time of their occurrence. In terms of habitat, both models identified the highest number of high-risk bird species in wetlands, with weighted additive model at  $6.9 \pm 1.9$  and risk matrix model at  $7.7 \pm 3.1$ , followed by towns, with weighted additive model at  $4.4 \pm 1.5$  and risk matrix model at  $5.5 \pm 2.6$ , while the numbers of high-risk bird species in the rest three habitats were similar (Table 2). On the basis of the habitat preferences of high-risk bird species around Zhongchuan Airport, they can be categorized into the following five groups: bird species of focus in wetland, bird species of focus in town, bird species of focus in desert grassland, bird species of focus in artificial forest, and bird species of focus in farmland, and precautions should be taken according to the habitats in which these high-risk bird

species occur. [Conclusion] The number of high-risk bird species at the airport was the highest in April and October and the lowest in July. Wetlands had the highest bird strike risk, followed by towns, and the numbers of high-risk bird species in the other habitats were similar. Airport staff were supposed to target high-risk bird species in prevention of potential safety hazards based on their occurrence time and habitats.

**Key words:** Bird strike risk assessment; Lanzhou Zhongchuan International Airport; Avian community structure changes; Weighted additive model; Risk matrix model

鸟击(bird strike)指的是鸟类与飞机在空中相撞所产生的事故(周加良 1994)。近年来,鸟击已成为航空安全的一个主要问题(Lopez-Lago et al. 2017),鸟击事件不仅造成了严重的人员伤亡和经济损失(De Vault et al. 2017, International Civil Aviation Organization 2022),也极大影响了鸟类数量(Andrews et al. 2022)。如何采取有效措施来预防鸟击的发生已经引发了人们越来越多的关注。

近年来,随着人们对鸟击的愈发重视,国内许多机场都在鸟情调查的基础上开展鸟击防范工作,并提出了许多识别鸟击高风险鸟种的方法。如王丽君等(2010)通过综合鸟类相对数量、遇见频率、生境利用率和飞行高度四个指标识别出合肥骆岗国际机场 11 种鸟类具有较高的鸟击风险;赵焕乐等(2016)通过对鸟类数量、集群系数和飞行高度等七个因子进行权重赋值并加和识别出扎兰屯成吉思汗机场具有严重危险的鸟类 14 种;廖峻涛等(2018)基于鸟类飞行高度计算分析指出,昆明长水国际机场飞行区普通鵟(*Buteo buteo*)、灰头麦鸡(*Vanellus cinereus*)和小白腰雨燕(*Apus affinis*)三种鸟类对飞行安全有重大威胁;Hu 等(2020)使用风险矩阵结合鸟类相对数量成分、相对重量成分、飞行高度、集群系数及活动范围风险系数 5 个因子识别出了鄂尔多斯机场有严重威胁的 20 种鸟类。其中,赵焕乐等(2016)所使用的权重加和模型和 Hu 等(2020)所使用的风险矩阵模型考虑因素全面,数据也易收集,兼有科学客观和可操作性强的优点。二者比较而言,权重加和模型是对多个因子进行权重赋值后加和,使得数量和重量这两种因

素对鸟击风险值起着更为重要的作用;风险矩阵模型将鸟击发生的可能性与严重性两个相对较为独立的因素通过矩阵的方式结合了起来,这使得一个鸟种只有当其造成鸟击的可能性和严重性同时较高时才会被认定为鸟击高风险鸟种。这两个模型各有特点,将两者同时应用能够为鸟种鸟击风险进行更为科学客观的评价。

季节的更替常常引起食物资源波动和栖息地环境改变,这使得许多地区鸟类群落结构随季节变化十分明显,如太原武宿国际机场(程雷等 2020)、南昌昌北国际机场(陈斌等 2020)及南京禄口国际机场(周雨桐等 2023)。因此,一些被评为鸟击高风险的鸟种并非全年都会在机场周边出现,部分被评为鸟击低风险的鸟种可能在某些时段鸟击风险非常高。如果忽略季节变化所带来的鸟击风险变化,而仅仅全年重点防范高风险鸟种,这不但可能导致人力及物力资源的浪费,还容易造成对某些潜在高风险鸟种防范的疏忽。为此,本研究于 2023 年 3 月至 2024 年 2 月在兰州中川国际机场周边 10 km 范围内逐月进行鸟情调查,分别使用权重加和模型(赵焕乐等 2016)和风险矩阵模型(Hu et al. 2020)评估鸟类鸟击风险,以期划出机场各月的重点鸟击防范对象,为机场的鸟击防范工作提供科学依据。

## 1 研究地区概况

兰州中川国际机场(103°37'00" E, 36°30'28" N)(以下简称“中川机场”)地处甘肃省兰州市西北方向 53 km 处,海拔 1 947 m,是我国西北地区重要的交通枢纽。兰州市地处

甘肃省中部，中国西北黄土高原地区，地势西北高、东南低，属温带大陆性气候，年均温6~9℃，年均降水量300~494 mm，气候条件具有干旱、降水量少、蒸发量大、年温差大的特点（Zhang et al. 2022）。

## 2 研究方法

### 2.1 调查方法

以中川机场跑道中心点为圆心，半径10 km圆的范围作为研究区域。根据《生物多样性观测技术导则 鸟类》（中华人民共和国生态环境部2014），将研究区域内的生境划分为城镇、荒漠草原、农田、人工林和湿地5种类型。根据兰州市的气候特点，将兰州市的季节划分为春季（3~5月）、夏季（6~8月）、秋季（9~10月）和冬季（11月至翌年2月）。采用样线法和样点法进行调查，样线和样点的布设覆盖研究范围内所有生境类型（图1），包含机场围界内（样线C04）、机场围界到周边4 km范围（样

线F01~F04和C01）、机场外4~10 km圆环范围（样点P1~P5，以及样线F05~F08、C02和C03）三个区域，共布设样线12条，包括8条步行样线（F01~F08）和4条车载样线（C01~C04），样点5个。

野外调查于2023年3月至2024年2月进行，其中，春秋两季每月调查2次，冬夏两季每月调查1次，每次调查持续2 d，春秋季节两次调查的时间间隔10 d以上。调查选择在晴朗、风力较弱的条件下进行，时间为7:00~11:00时和15:00~19:00时。调查以2~4人为一组，观察记录鸟类的种类、数量、飞行高度和活动生境等信息，其中，步行样线以1~2 km/h的速度步行，车载样线以5~10 km/h的驱车速度进行；样点法在样点进行10 min定点观测。使用测距仪（Mileseey PF210，深圳市迈测科技股份有限公司）测量鸟类的飞行高度。若鸟类的飞行高度难以直接测量，则通过测量其附近参照物如树、电杆、建筑物等的高度间接获得鸟

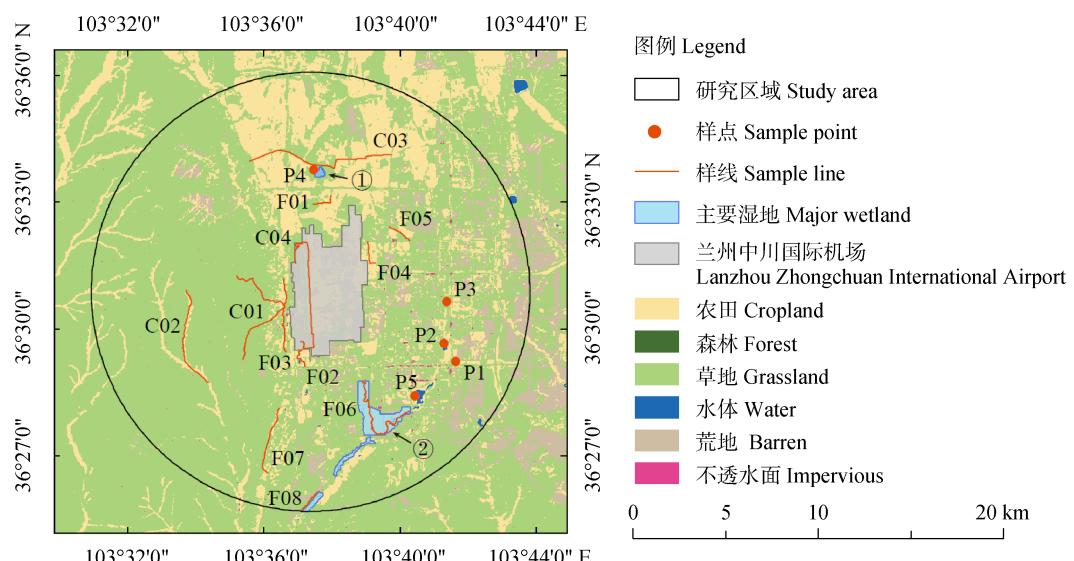


图1 调查样线及样点分布

Fig. 1 Distribution of sample lines and points

底图：30 m 中国土地覆盖数据集（2022年）（Yang et al. 2021），底图未做修改。C01~C04为车载样线，F01~F08为步行样线。主要湿地：①. 尖山庙水库，②. 秦王川国家湿地公园。

Base map: 30 m China annual land cover dataset (2022) (Yang et al. 2021), unmodified. C01 - C04 were sample lines conducted by car, and F01 - F08 were on foot. Major wetland: ①. Jianshanmiao Reservoir; ②. Qinwangchuan National Wetland Park.

类的近似高度。对于不确定的鸟种, 先标注除种类外的信息, 对其录音或拍照后在调查结束后鉴定。鸟类鉴定依据《中国鸟类观察手册》(刘阳等 2021), 鸟类分类依据《中国鸟类分类与分布名录》(第 4 版, 郑光美 2023), 居留型依据调查数据并结合《中国鸟类分类与分布名录》(第 4 版, 郑光美 2023) 进行划分, 鸟类区系参照《中国动物地理》(张荣祖 2011) 和《中国鸟类观察手册》(刘阳等 2021), 保护等级参照《国家重点保护野生动物名录》(国家林业和草原局 2021)。

## 2.2 数据分析

**2.2.1 权重加和模型 (赵焕乐等 2016)**  $R = 0.05 P + 0.05 T + 0.2 N + 0.3 W + 0.1 D + 0.15 G + 0.15 H$ , 式中,  $R$  为鸟击风险值,  $P$  为相对空间成分,  $T$  为相对时间成分,  $N$  为相对数量成分,  $W$  为相对重量成分,  $D$  为距离系数,  $G$  为集群系数,  $H$  为飞行高度风险系数。

$P$  = 某种鸟出现的样线及样点数/分布最广的鸟种出现的样线及样点数

$T$  = 某种鸟出现的调查次数/发现次数最多的鸟种出现的调查次数

$N$  = 某种鸟的个体数/数量最多的鸟种个体数

$W$  = 某种鸟体重/体重最重鸟的体重

$D$  (距离系数): 根据鸟出现的位置将其划分为三个等级, 机场围界内, 赋值 0.9; 机场围界外至 4 km 范围内, 赋值 0.6; 机场外 4 ~ 10 km 范围内, 赋值 0.3。若一个鸟种在多个位置出现,

则以其距离机场最近的位置进行赋值。

**$G$  (集群系数):** 根据野外调查所观察到的鸟类集群的情况将其分为集大群 (常集群 20 只以上)、集小群 (常集群 5 ~ 20 只) 或偶尔集群、不集群 (较少集群且集群数量 5 只以内或常单独活动) 三个等级, 分别赋值 1.0、0.5、0.0。

**$H$  (飞行高度风险系数):** 根据调查记录计算某种鸟的平均飞行高度  $h$ , 划分为  $0 \text{ m} \leq h < 5 \text{ m}$ 、 $5 \text{ m} \leq h < 30 \text{ m}$ 、 $30 \text{ m} \leq h < 50 \text{ m}$ 、 $50 \text{ m} \leq h < 100 \text{ m}$  和  $h \geq 100 \text{ m}$  五个等级, 分别赋值 0.1、0.5、1.0、0.5、0.1。

根据  $R$  值大小将鸟类的鸟击风险等级划为 4 级, 高危,  $R \geq 0.4$ ; 中危,  $0.3 \leq R < 0.4$ ; 低危,  $0.22 \leq R < 0.3$ ; 无危,  $R < 0.22$ 。

**2.2.2 风险矩阵模型 (Hu et al. 2020)** 鸟击风险取决于鸟击发生的可能性和严重性, 使用鸟击风险矩阵将鸟击发生的可能性和严重性结合以评估鸟击风险 (表 1)。为了方便比较权重加和模型和风险矩阵模型所评估的鸟击风险等级, 此模型的风险矩阵在原来的基础上做了一定的修改。

可能性 = (集群系数 + 飞行高度风险系数 + 距离系数)  $\times 100 / 3$

严重性 = (相对重量成分 + 相对数量成分)  $\times 100 / 2$

其中, 距离系数、相对重量成分、相对数量成分计算方式与权重加和模型相同。集群系数: 根据鸟类集群的大小分为四个等级, [1, 3)、[3, 20)、[20, 100)、100 以上, 分别赋值 0、0.2、

表 1 机场鸟击风险矩阵

Table 1 Risk matrix of bird strike at the airport

		严重性 Severity				
		极高 Very high	高 High	中 Moderate	低 Low	极低 Very low
可能性 Likelihood	极高 Very high	4	4	4	3	3
	高 High	4	4	3	3	2
	中 Moderate	4	3	2	2	1
	低 Low	3	3	2	1	1
	极低 Very low	2	2	1	1	1

0.5、1。飞行高度风险系数的赋值与权重加和模型相同，在飞行高度取值时，取观察记录到该鸟种风险最高的高度。可能性和严重性根据 Hu 等（2020）分为 5 个等级。

同时，对以下鸟种的鸟击风险等级进行调整：猛禽鸟击风险等级加 1；每月调查中，被目击到平均每次调查穿过跑道或跑道上空 1 次及以上者，当月风险等级加 1。

**2.2.3 模型相似性指数** 采用修改后的群落相似性指数（Sorenson 1957）作为衡量两个模型评估结果相似程度的指标： $S = 2c / (a + b)$ ，式中， $S$  表示模型相似性指数， $a$  为模型 1 识别的高危鸟种数， $b$  为模型 2 识别的高危鸟种数， $c$  为两模型共同识别的高危鸟种数。数据以平均值 ± 标准差表示。

以上数据分析在 Excel 2023 和 Origin 2021 中进行。

**2.2.4 鸟类密度估计** 使用 R 4.3.1 中的 Distance 包（Miller et al. 2019）对高危鸟种当月密度进行估计。由于本研究样点数较少，无法对鸟类密度进行准确估计，且许多鸟种在当月无样点记录，故本研究仅使用样线调查结果进行密度估计（孙文婷等 2012）。使用 Distance 包中的 3 种关键分布函数，即均匀分布（uniform）、半正态分布（half-normal）和风险率分布（hazard-rate）对鸟类数据进行拟合；此外，每个关键函数再分别使用余弦（cosine）、简单多项式（simple polynomial）和厄密多项式（Hermite polynomial）级数展开调整，一共建产生 9 种组合（郑炜等 2012，陈道剑等 2019）。使用赤池信息量准则（Akaike information criterion, AIC）对 9 种函数模型进行筛选，将 AIC 值最小的函数模型作为最终的函数模型（Akaike 1974）。使用 K1、K2 和 K3 分别代表关键函数中的均匀分布、半正态分布和风险率分布，使用 S1、S2 和 S3 分别代表余弦、简单多项式和厄密多项式三种级数展开。

### 3 结果

#### 3.1 鸟类调查结果

2023 年 3 月至 2024 年 2 月，在兰州中川国际机场周边共记录到鸟类 187 种 29 677 只 [含家鸽（*Columba livia domestica*）]，隶属 19 目 50 科（电子附录 1）。在目水平上，雀形目鸟类最多，共 73 种，占比 39.04%，鸽形目次之，共 35 种，占比 18.72%；在科水平上，鸭科鸟类最多，有 24 种，占调查所记录总鸟种数的 12.83%。被列入《国家重点保护野生动物名录》的有 30 种，其中国家一级重点保护野生动物 4 种，国家二级重点保护野生动物 26 种。就居留型而言，留鸟 42 种，占比 22.46%；夏候鸟 36 种，占比 19.25%；冬候鸟 38 种，占比 20.32%；旅鸟 71 种，占比 37.97%。从分布区系看，古北界鸟类有 125 种，占比 66.84%，广布种有 62 种，占比 33.16%。

包括家鸽在内，记录物种数最多的月份为 4 月，共记录 120 种，最少为 12 月，共记录 55 种。记录鸟类个体数最多的月份为 10 月，记录个体数为 5 043 只，记录鸟类个体数最少的月份为 7 月，记录个体数为 988 只。

#### 3.2 鸟击风险评估

**3.2.1 高危鸟种组成** 从权重加和模型和风险矩阵模型的评估结果来看，有 41 种鸟类全年至少有一个月被一个模型识别为高危鸟种，其中有 25 种鸟类全年至少一个月被权重加和模型识别为高危，有 38 种鸟类全年至少一个月被风险矩阵模型识别为高危（电子附录 2）。这 41 种鸟类中，鹰科鸟类最多，有 12 种，占比 29.27%，其次为鸭科，有 8 种，占比 19.51%。从居留型上看，41 种鸟类中留鸟最多，有 18 种，占这些高危鸟种总数的 43.90%，其次为旅鸟和冬候鸟，均为 10 种，分别占比 24.39%，最后为夏候鸟，有 3 种，占比 7.32%（电子附录 1）。

**3.2.2 高危鸟种月间变化** 权重加和模型识别出高危鸟类每月有  $(7.7 \pm 1.8)$  种，高危鸟种最

多的月份为 10 月 (11 种), 其次为 5 月 (10 种), 最少为 7 月 (5 种); 风险矩阵模型识别出高危鸟类每月 ( $9.7 \pm 3.8$ ) 种, 高危鸟种最多的月份为 4 月 (18 种), 其次为 10 月 (14 种), 最少为 7 月 (5 种); 两个模型识别的高危鸟种在 3 月最为相似, 相似性指数为 0.923, 在 12 月和 1 月差别最大, 这两个月份相似性指数均为 0.500 (电子附录 2)。被识别为高危的鸟种不论留鸟还是候鸟, 在各月的密度都不尽相同, 总体而言, 在冬季密度会更大, 而在夏季密度较小 (电子附录 2, 3)。

根据中川机场周边高危鸟种出现的时间特点, 可以大致将其分为以下四类。

(1) 全年重点关注鸟种, 包括白骨顶 (*Fulica atra*)、绿头鸭 (*Anas platyrhynchos*)、喜鹊 (*Pica serica*)、麻雀 (*Passer montanus*) 和家鸽。此类鸟为机场周边留鸟, 种群数量较大且几乎全年稳定, 需要全年注意防范。

(2) 繁殖季重点关注鸟种, 包括家燕 (*Hirundo rustica*) 和普通雨燕 (*Apus apus*), 此类鸟为机场周边夏候鸟, 当在繁殖季对其重

点关注。

(3) 迁徙季重点关注鸟种, 包括鹗 (*Pandion haliaetus*)、草原雕 (*Aquila nipalensis*)、黑鸢 (*Milvus migrans*) 等猛禽和普通鸬鹚 (*Phalacrocorax carbo*) 等水鸟, 此类鸟多为机场周边旅鸟, 应注意把控其迁徙路过机场周边的时间进行防范。

(4) 越冬季重点关注鸟种, 包括白尾鹞 (*Circus cyaneus*) 和普通秋沙鸭 (*Mergus merganser*) 等, 这些鸟多为机场周边冬候鸟, 在机场周边有相对较大的越冬种群, 应在越冬季对其重点关注。

**3.2.3 高危鸟种生境分布** 从生境来看, 根据权重加和模型, 湿地生境风险最高, 每月高危鸟种数为  $6.9 \pm 1.9$ , 其次为城镇, 为  $4.4 \pm 1.5$ , 荒漠草原风险最低, 为  $3.0 \pm 1.0$ ; 根据风险矩阵模型, 湿地生境风险最高, 月均高危鸟种数为  $7.7 \pm 3.1$ , 其次为城镇, 为  $5.5 \pm 2.6$ , 最后为农田, 为  $3.0 \pm 1.3$  (表 2)。

根据中川机场周边高危鸟种的栖息地偏好, 可以大致将其分为以下五类:

表 2 两种模型识别出各生境各月的高危鸟种数

Table 2 Monthly number of high-risk bird species identified by two models in each habitat

月份 Month	城镇 Town	荒漠草原 Desert grassland	农田 Farmland	人工林 Artificial forest	湿地 Wetland
1	4/4	3/1	3/2	4/1	7/4
2	2/2	4/3	4/2	5/3	7/6
3	6/5	5/4	5/4	3/2	4/4
4	7/12	4/8	2/5	4/4	8/14
5	5/6	4/6	2/3	4/5	8/10
6	4/7	2/5	3/4	3/5	7/9
7	3/4	2/3	3/4	3/4	4/4
8	4/5	2/2	2/1	3/2	6/7
9	3/3	2/1	1/1	2/1	7/7
10	6/8	4/5	3/4	5/5	11/11
11	3/4	2/3	2/4	3/6	6/7
12	3/6	3/7	1/2	1/2	8/9
平均值 Mean value	4.2/5.5	3.0/4.0	3.6/3.0	3.3/3.3	6.9/7.7

数据格式: 权重加和模型识别出高危鸟种数/风险矩阵模型识别出高危鸟种数。

Data format: number of high-risk species identified by the weighted additive model/number of high-risk species identified by the risk matrix model.

(1) 湿地生境重点关注鸟种, 包括绿头鸭、斑嘴鸭 (*Anas zonorhyncha*)、针尾鸭 (*A. acuta*)、赤麻鸭 (*Tadorna ferruginea*)、白骨顶和苍鹭 (*Ardea cinerea*) 等。机场周边水体较多, 尤其北部的尖山庙水库和南部的秦王川国家湿地公园面积大且鸟类种类、数量繁多, 当重点关注。

(2) 城镇生境重点关注鸟种, 包括麻雀、喜鹊和家鸽等。此类鸟多为典型的伴人居鸟类, 其觅食、繁殖与栖息等行为都离不开人类居所, 当在城镇处加强对这些鸟的关注。

(3) 荒漠草原生境重点关注鸟种, 包括草原雕、环颈雉 (*Phasianus colchicus*) 和戴胜 (*Upupa epops*) 等。此类鸟或依赖机场周边荒山迁飞, 或为典型的荒漠区栖居鸟类, 当在机场西部和东南部大片的荒漠草原生境重点防范。

(4) 人工林生境重点关注鸟种, 包括赤颈鸫 (*Turdus ruficollis*)、雀鹰 (*Accipiter nisus*) 等。此类鸟多依赖树林作为其栖息地, 当在机场西部、西南部和东北部的人工林生境加强对这些鸟类的关注。

(5) 农田生境重点关注鸟种, 包括灰斑鸠 (*Streptopelia decaocto*)、金翅雀 (*Chloris sinica*) 和普通鵖等。此类鸟多在农田区域集中觅食。机场周边的农田大片集中在机场北部, 应当在作物成熟的季节重点关注此区域。

## 4 讨论

### 4.1 中川机场鸟情特点

中川机场地处我国西北黄土高原地区, 动物区系上属古北界。本次调查共记录到中川机场周边 187 种鸟, 其中古北界鸟类 125 种, 占比 66.84%, 其余为广布种, 这与中川机场的地理特征相一致。同时, 中川机场的鸟种组成与周边临近地区机场, 如银川河东国际机场 (柳毅等 2021)、咸阳国际机场 (郑佳等 2015)、内蒙古乌海机场 (李敏等 2011) 及巴彦淖尔机场 (王维等 2015) 较为相似, 且上述 4 项研究

所记录的机场周边高危鸟种, 如环颈雉、麻雀、家燕、灰斑鸠和赤麻鸭等, 在本研究中全年至少有一个月被两个模型同时评为高危鸟种, 这反映了鸟类群落结构与其所处环境密切相关 (崔鹏等 2007)。

### 4.2 模型差异与缺陷

本研究所涉及的两个模型虽都将鸟类数量、重量等 5 个影响鸟击风险的重要因素纳入了评估中, 但从结果来看, 二者所识别的高危鸟种仍存在一定差异。这样的差异主要体现在雁鸭类、猛禽、鸠鸽类和喜鹊等鸟类中。造成二者结果差异的因素可能有两点: (1) 从评估方式而言, 两个模型考虑的因素有所不同, 对集群系数和飞行高度的计算方式有所不同, 且对几个因子的结合方式也存在差异; (2) 从结果调整上看, 权重加和模型并未对结果采取任何的调整, 而风险矩阵模型对猛禽及被观察到穿过跑道的鸟类风险等级加一。

需要指出的是, 除了本研究所涉及的两种模型, 还有许多模型被用于机场鸟击风险评估中, 但这些模型都存在一定的局限性。如有研究者在计算飞行高度风险值时, 对处于 30~50 m 高度飞行的鸟类鸟击风险赋值最大 (赵焕乐等 2016)。但事实上, 鸟击的发生概率很大程度上取决于鸟类的飞行轨迹与飞机飞行轨迹的重叠情况, 故应将鸟类的飞行高度和其所处位置结合起来考虑。

### 4.3 高危鸟种时间特点

中川机场地理位置处于鸟类中部迁徙路线上, 气候上具有四季更替明显、年温差大的特征, 不同月份鸟类的种类和数量因为其扩散和迁徙而出现明显差异。从鸟击风险评估结果来看, 中川机场高危鸟种数随时间变化呈现出两个峰值, 分别在 4 月和 10 月, 与机场周边鸟种数的变化趋势一致。这可能是由于在春秋两季, 鸟类的迁徙和扩散等活动使得机场周边鸟类种类、数量增加的同时其活动范围也大大增加, 鸟击风险也就随之增加。7 月, 许多鸟类因繁殖育雏更少集群, 活动范围缩小, 加上此时又

处于非迁徙时间，鸟类的种类和密度都非常小，相对较少的鸟种数和个体数以及鸟类更为保守谨慎的行为使得这段时间机场鸟击风险较低。3月虽到了迁徙季，但高危鸟种数相较于冬季却相对更少，这可能是由于冬季鸟类集群现象更加普遍，例如，绿头鸭等雁鸭类以及赤颈鹤等雀鸟均存在集大群的现象，而3月迁徙伊始，机场周边的冬候鸟陆续迁走，旅鸟和夏候鸟却仅有少数到达，故虽3月鸟种数较冬季略有上升，但个体数却存在明显下降，此时的鸟击风险相较于冬季相对更小。

#### 4.4 高危鸟种栖息地偏好

除了时间上的差异，高危鸟种的空间分布也呈现一定的变化。中川机场周边湿地面积较大，环境复杂多样，能够为多种不同生态位的水鸟提供适宜的栖息环境，加之湿地鸟类，如雁鸭类等多具有数量多、体重大、易集群的特点，这使得湿地生境鸟击风险很高。城镇生境包括城区、城市绿地和村庄等多种环境，复杂多样的环境吸引了许多鸟类在此栖息。其中许多鸟类高度适应城市生活，不但数量较多，并且不甚惧人，常常在机场周边甚至机场围界内活动，如家鸽、灰椋鸟(*Spodiopsar cineraceus*)和灰斑鸠等，很容易威胁到航空安全。其余3种生境中，荒漠草原生境相较于其他生境而言环境较为恶劣，农田生境环境受季节影响大，而人工林生境仅能为中川机场周边为数不多的林鸟提供适宜的栖息地，三者相较于湿地和城镇环境较为单一，鸟类种类和数量都相对更少，鸟击风险相对较低。

#### 4.5 鸟击防范策略

(1) 做好长期鸟情监测：机场工作人员应在机场周边各种典型生境都设置样线或样点并定期调查，密切关注机场周边鸟类群落的变化情况，及时对潜在风险做出应对。

(2) 根据鸟情合理调配驱鸟人员：本研究揭示了中川机场周边高危鸟种出现的时间和生境，机场可以根据此结果合理调配驱鸟人员，在特定的时间和地点对高危鸟种进行重点

防范。

(3) 合理进行生境改造：可以参考上海浦东国际机场(余路等2013)“种青引鸟”的方式，在远离机场的地方建立高质量的栖息地，将机场周边的鸟类吸引到远离机场的区域，以降低鸟击风险。

(4) 加强对周边居民的宣传交流：从调查情况来看，中川机场周边家鸽数量较多，有较大的鸟击风险，机场工作人员当做好对周边居民的走访调查，向其宣传在机场周边放飞家鸽的可能危害，严厉禁止在机场周边放飞家鸽。

(5) 做好跑道周边草坪的防范：机场草坪因其能够为多种鸟类提供食物和隐蔽场所而吸引鸟类(刘安专等2020)。机场应做好草坪的杀虫灭鼠工作，定期割草避免草地结籽，并注意在割草后及时将草地清理干净，以防止草屑肥沃土壤以及吸引更多的昆虫和鸟类(马娟娟2021)。如果条件允许，可以通过人工种植不吸引鸟类的草种，如结缕草(*Zoysia japonica*)和牛筋草(*Eleusine indica*)(李晓娟等2010，马金生等2012)等，降低草地生境异质性，从而降低对鸟类的吸引。此外，机场还应注意及时查看并清理草坪上鸟网所捕获的鸟，以防止这些鸟类吸引雕鸮(*Bubo bubo*)等猛禽。

**电子附录** 电子附录见本文网络版(<http://dwxzz.izoz.ac.cn>)。

#### 参 考 文 献

- Akaike H. 1974. A new look at the statistical model identification. IEEE Transactions on Automatic Control, 19(6): 716–723.
- Andrews R, Bevrani B, Colin B, et al. 2022. Three novel bird strike likelihood modelling techniques: The case of Brisbane Airport, Australia. PLoS One, 17(12): e0277794.
- DeVault T L, Blackwell B F, Belant J L, et al. 2017. Wildlife at airports. Wildlife Damage Management Technical Series, 1–19.
- Hu Y Y, Xing P, Yang F, et al. 2020. A birdstrike risk assessment model and its application at Ordos Airport, China. Scientific Reports, 10: 19627.
- International Civil Aviation Organization. 2022. ICAO safety report.

- 2022 edition. [R/OL]. [2024-03-06]. [https://www.icao.int/safety/documents/ICAO\\_SR\\_2022.pdf](https://www.icao.int/safety/documents/ICAO_SR_2022.pdf).
- Lopez-Lago M, Casado R, Bermudez A, et al. 2017. A predictive model for risk assessment on imminent bird strikes on airport areas. *Aerospace Science and Technology*, 62: 19–30.
- Miller D L, Rexstad E, Thomas L, et al. 2019. Distance sampling in R. *Journal of Statistical Software*, 89(1): 1–28.
- Sørensen T. 1957. A method of establishing groups of equal amplitude in plant sociology based on similarity of species and its application to analyses of the vegetation on Danish commons. *Biologiske skrifter kongelige Danske videnskabernes selskab*, 5: 1–34.
- Yang J, Huang X. 2021. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019. *Earth System Science Data*, 13(8): 3907–3925.
- Zhang X, Ren Y Y, Zhang D, et al. 2022. Construction of the green infrastructure network for adaption to the sustainable future urban sprawl: a case study of Lanzhou City, Gansu Province, China. *Ecological Indicators*, 145: 109715.
- 陈斌, 邓宝琴. 2020. 南昌昌北国际机场鸟类多样性及季节性变化. *野生动物学报*, 41(2): 359–368.
- 陈道剑, 庚太林, 邹发生. 2019. 样线法调查中森林鸟类有效宽度的选择. *生态学杂志*, 38(10): 3228–3234.
- 程雷, 王晓斌, 徐彦昭, 等. 2020. 太原武宿国际机场鸟类多样性特征及鸟击防控. *生态学杂志*, 39(6): 2014–2023.
- 崔鹏, 邓文洪. 2007. 鸟类群落研究进展. *动物学杂志*, 42(4): 149–158.
- 国家林业和草原局. 2021. 国家林业和草原局 农业农村部公告 (2021年第3号) (国家重点保护野生动物名录). [EB/OL]. [2024-03-06]. [https://www.forestry.gov.cn/html/main/main\\_5461/20210205122418860831352/file/20210205151950336764982.pdf](https://www.forestry.gov.cn/html/main/main_5461/20210205122418860831352/file/20210205151950336764982.pdf).
- 李敏, 杨贵生, 邢璞, 等. 2011. 内蒙古乌海民航机场鸟类多样性与鸟撞防范. *生态学杂志*, 30(8): 1678–1685.
- 李晓娟, 周材权, 景望春, 等. 2010. 机场植被管理与鸟击灾害防范的研究. *中国安全生产科学技术*, 6(1): 78–82.
- 廖峻涛, 吕鸿, 张峰, 等. 2018. 昆明长水国际机场飞行区鸟类飞行高度及鸟撞风险评估. *云南大学学报: 自然科学版*, 40(1): 192–200.
- 刘安专, 曾煜, 许青, 等. 2020. 齐齐哈尔机场春季鸟类群落与鸟击预防. *野生动物学报*, 41(2): 349–358.
- 刘阳, 陈水华. 2021. 中国鸟类观察手册. 长沙: 湖南科学技术出版社.
- 柳毅, 王成华, 薛海明, 等. 2021. 银川河东国际机场鸟击风险评估与鸟击防范研究. *安徽农业科学*, 49(12): 84–87, 93.
- 马金生, 孟祥海, 张建生, 等. 2012. 飞机场植被与鸟击防范的研究. *齐鲁师范学院学报*, 27(5): 56–63.
- 马娟娟. 2021. 延吉朝阳川民航机场景观格局对鸟类群落结构的影响及鸟击防治措施研究. 昆明: 云南大学硕士学位论文, 54–55.
- 孙文婷, 赵思琪, 马丽丽, 等. 2012. Distance 在样线法和样点法鸟类调查中的结果差异研究. *安徽农业科学*, 40(27): 13383–13384, 13436.
- 王丽君, 周立志, 万政云, 等. 2010. 骆岗机场鸟类多样性及鸟击风险分析. *野生动物*, 31(3): 127–130.
- 王维, 李士伟, 张媛媛, 等. 2015. 巴彦淖尔民航机场鸟击风险评估及鸟击防范. *内蒙古大学学报: 自然科学版*, 46(3): 292–300.
- 余路, 张青磊, 申瑞娜, 等. 2013. 上海机场关于绿色机场与可持续发展的战略与实践. *中国产经*, (8): 46–47.
- 张荣祖. 2011. 中国动物地理. 北京: 科学出版社, 281–315.
- 赵焕乐, 王彤, 杨帆, 等. 2016. 扎兰屯成吉思汗机场鸟类多样性与鸟击防范. *生态学杂志*, 35(12): 3344–3352.
- 郑光美. 2023. 中国鸟类分类与分布名录. 4 版. 北京: 科学出版社.
- 郑佳, 贾晓东, 杨兴中. 2015. 咸阳国际机场鸟类群落调查及鸟击防范措施. *生态学杂志*, 34(6): 1607–1613.
- 郑炜, 葛晨, 李忠秋, 等. 2012. 鸟类种群密度调查和估算方法初探. *四川动物*, 31(1): 84–88.
- 中华人民共和国生态环境部. 2014. 生物多样性观测技术导则 鸟类. [EB/OL]. [2024-03-06]. <https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/zbzwb/stzl/201411/W020141115347006806174.pdf>.
- 周加良. 1994. 飞机鸟撞事故分析、预防及建议. *宁波大学学报: 理工版*, 7(1): 16–23.
- 周雨桐, 徐嘉晖, 胡东方, 等. 2023. 南京禄口国际机场鸟类群落功能和谱系多样性及鸟击防范研究. *南京师大学报: 自然科学版*, 46(3): 69–78.