

卫星跟踪揭示撞击电线是黑颈鹤幼鸟越冬地死亡的主要原因

王博驰^① 裴雯^② 色拥军^② 杨巨才^② 王煜明^② 杨海蓉^②
付红彦^② 于凤琴^③ 王子建^① 郎雪敏^① 蒲真^① 郭玉民^{①*}

①北京林业大学生态与自然保护学院 北京 100083;

②盐池湾国家级自然保护区管理局 酒泉 736300; ③北京绿野方舟 北京 102218

摘要: 利用卫星跟踪对出生于甘肃盐池湾国家级自然保护区（以下简称盐池湾）内的黑颈鹤（*Grus nigricollis*）幼鸟在越冬地撞击电线死亡的现象以及可能造成的影响进行研究。2018 和 2019 年两年的 7 和 8 月在盐池湾内为 16 只黑颈鹤幼鸟安装卫星跟踪器。之后每日在 Tracker Client 软件中对黑颈鹤幼鸟的行动进行实时监测，发现异常行为后随即通知当地志愿者对幼鸟撞击电线进行确认。2019 和 2020 年 1 至 3 月在西藏林周县开展实地调查，对发生撞击的电线位置进行记录并留存黑颈鹤残骸的影像资料。采用线性模型分析 2013 至 2020 年盐池湾黑颈鹤种群数量随时间的变化趋势。研究结果显示，2018 年出生的黑颈鹤，其撞击死亡率为 40.0%；2019 年出生的黑颈鹤撞击死亡率为 83.3%；撞击电线是该黑颈鹤种群幼鸟在越冬地死亡的主要原因。撞击事件大多集中发生在河谷地带，该处分布有大量农田。撞击发生前幼鸟的活动区域内均有电线分布，幼鸟与电线发生过相互作用。线性模型分析显示，盐池湾黑颈鹤种群除成年个体外，幼鸟和亚成体的数量均呈上升趋势。幼鸟在越冬地的撞击死亡并未给该种群的数量造成严重影响，但鉴于撞击事件的严重性，仍建议在黑颈鹤越冬地为电线采取防鸟撞措施，同时对燃放爆竹等情况加以适当引导，尽量减少对黑颈鹤的干扰。

关键词: 黑颈鹤；盐池湾；撞击电线；卫星跟踪；线性模型

中图分类号: Q958 文献标识码: A 文章编号: 0250-3263 (2021) 02-161-10

Colliding with Power Lines Being the Main Reason of the Death of Satellite-Tracked Black-necked Crane Juveniles in Wintering Area

WANG Bo-Chi^① PEI Wen^② SE Yong-Jun^② YANG Ju-Cai^② WANG Yu-Ming^②
YANG Hai-Rong^② FU Hong-Yan^② YU Feng-Qin^③ WANG Zi-Jian^①
LANG Xue-Min^① PU Zhen^① GUO Yu-Min^{①*}

①School of Ecology and Nature Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083;

②Administration of Yanchiwan National Nature Reserve, Jiuquan 736300; ③Wildlife Ark, Green Cross, Beijing 102218, China

基金项目 国家自然科学基金项目（No. 31770573）；

* 通讯作者, E-mail: bird168@126.com;

第一作者介绍 王博驰, 男, 硕士研究生; 研究方向: 鸟类生态学; E-mail: wbochi@163.com。

收稿日期: 2020-07-20, 修回日期: 2020-12-02 DOI: 10.13859/j.cjz.202102001

Abstract: From July to August in 2018 and 2019, 16 Black-necked Crane (*Grus nigricollis*) juveniles born in Yanchiwan National Nature Reserve, Gansu (hereinafter referred to as Yanchiwan) were installed with satellite trackers. Here we studied the death of these satellite-tracked birds caused by colliding with power lines over the winter and its possible effects. After the satellite trackers were installed, with daily real-time monitoring of the action of the juveniles in the Tracker Client software, we immediately notified local volunteers to confirm if the juveniles had died of colliding with power lines after abnormal actions been found. From January to March in 2019 and 2020, the field survey was carried out in Linzhou County, Tibet, to record the locations of the power lines with which the juveniles collided and the image data of the remains of the Black-necked Cranes. The linear model was used to analyze the changes over time in the number of the Black-necked Cranes in the Yanchiwan from 2013 to 2020. We found that the mortality of the Black-necked Cranes born in 2018 and 2019 were 40.0% and 83.3%. Colliding with power lines was the main reason for the death of the Black-necked Crane juveniles of the population in wintering area. Most of the collision locations were concentrated in the river valley (Fig. 1), where there was a large amount of farmland (Table 2). Before the collision, there were power lines scattering in the active area of the juveniles, and the power lines had interacted with the juveniles (Table 1). The linear model results showed that in the Yanchiwan Black-necked Crane population, except for adults, the numbers of juveniles and subadults were on the rise (Fig. 3). The mortality of juveniles in the wintering area did not seriously affect this population. We recommend to take measures to prevent bird strikes on the power lines in the wintering area, and at the same time, properly guide the setting off of firecrackers to minimize interference with Black-necked Cranes.

Key words: Black-necked Crane, *Grus nigricollis*; Yanchiwan Nature Reserve; Collision with power lines; Satellite tracking; Liner model

黑颈鹤（*Grus nigricollis*）隶属鹤形目（Gruiformes）鹤科（Gruidae）鹤属，是一种仅生活在高原的大型涉禽，为中国Ⅰ级重点保护野生动物，被IUCN列为全球性易危级（VU）物种。黑颈鹤在青藏高原繁殖，在云贵高原、雅鲁藏布江河谷地区以及不丹越冬（李凤山等2005）。盐池湾黑颈鹤种群繁殖于甘肃盐池湾，越冬于西藏林周县（Wang et al. 2020）。

在藏传佛教中黑颈鹤被视为一种吉祥神圣的象征，长久以来与当地居民和谐相处。然而，人类活动以及各种基础设施仍可能对繁殖和越冬的黑颈鹤造成威胁（Li et al. 2011，色拥军等2020），撞击电线就是其中之一。国外关于电线以及风力发电装置等人类电力设施对鸟类造成威胁的研究由来已久（Malcolm 1982，Brown et al. 1995，Desholm et al. 2005），尤其是各种濒危鸟类与电线之间的撞击、电击问题（Crivelli

et al. 1988，Ferrer et al. 1991，2000）。但国内有关鸟类撞击电线或受电击导致死亡的研究仍不多见，仅发表过少量相关研究（孔德军 2008，Li et al. 2011，王述潮等 2019）。本研究运用线性模型对盐池湾黑颈鹤幼鸟、亚成体、成体数量以及总数随时间的变化趋势进行拟合，再结合野外实地工作以及卫星跟踪数据，对该种群幼鸟在越冬地撞击电线死亡的原因及可能对种群数量造成的影响进行分析，以期为保护盐池湾黑颈鹤种群提出科学合理的意见。

1 研究区域及研究方法

1.1 研究区概况

黑颈鹤繁殖地盐池湾（95°21'~97°10' E，38°26'~39°52' N）位于甘肃省肃北蒙古族自治县东南部祁连山区，党河、疏勒河、榆林河上游，总面积136万hm²，海拔2 600~5 483 m。

盐池湾保护区内地形地貌复杂多变,包括草原、冰川、荒漠、湿地等。其中,党河湿地是黑颈鹤的重要繁殖地,每年约有35~40对黑颈鹤繁殖于此。党河湿地位于党河南山与野马南山两座雪山之间,冰川融水是湿地内的主要水源,因此湿地内的水位季节性变化较强。党河湿地西北部及东南部山体边缘的地貌以沼泽为主,是黑颈鹤的主要筑巢地,湿地内其他各处沼泽化草甸、盐化草甸、河流、湖泊交错分布,形成了复杂的景观地貌。

黑颈鹤越冬地林周县($90^{\circ}51' \sim 91^{\circ}28' E$, $29^{\circ}45' \sim 30^{\circ}08' N$)位于西藏藏族自治区首府拉萨市北部,具有典型的大陆性季风气候,年降雨量 $300 \sim 500 mm$,平均海拔 $3863 m$,总面积45.17万 hm^2 。每年约有1100只黑颈鹤越冬于此(杨乐等2016),约占全球黑颈鹤种群数量的10%。林周县卡孜乡是本研究开展调查的主要地点,以春小麦(*Triticum aestivum*)和青稞(*Hordeum vulgare*)为主的种植业是该地区的主要经济产业,因此农田构成了主要景观地貌。虎头山水库、卡则增、巴昌曲、彭波曲形成的湖泊及河流湿地也在景观中占据相当的比例。

1.2 研究方法

1.2.1 数据采集 盐池湾党河流域黑颈鹤的栖息地边缘大多有公路分布,可直接观察到湿地内的黑颈鹤,因此自2013年起至2020年,每年8和9月采用直接计数法对党河湿地内的黑颈鹤成鸟、幼鸟以及亚成体进行至少2次数量普查,当年数量以所记录数量最多的一次为准。

2018和2019年两年的7和8月对盐池湾的黑颈鹤幼鸟开展环志工作。所有环志个体都加装了湖南环球信士科技有限公司生产的HQLG4021S型腿环式卫星跟踪器,该型号跟踪器的总重量约为43.5 g,占幼鸟体重的3%以下。2018年环志10只个体,2019年环志6只个体。每只个体环志及跟踪器安装过程不会超过10 min,以尽量减少幼鸟的应激反应。安装

结束后在捕捉点原地释放幼鸟,确认幼鸟和亲鸟汇合后离开。

于2019和2020年两年的1至3月在西藏林周县开展实地调查,对死亡黑颈鹤个体的卫星跟踪器以及彩环进行回收,记录发生撞击的电线位点信息并留存黑颈鹤残骸的影像资料。

1.2.2 数据分析 自跟踪器安装起,每日在跟踪平台Tracker Client中对黑颈鹤幼鸟的活动进行实时监测,发现幼鸟活动异常后随即通知当地志愿者对黑颈鹤活动异常的原因进行确认。黑颈鹤发生撞击的时间及撞击点生境类型由Tracker Client软件监测和林周县当地志愿者共同确认。为体现黑颈鹤撞击发生前与电线之间的相互作用,采用最小凸多边形法(minimum convex polygon)对黑颈鹤撞击前6 h内的活动区面积进行评估,同时对活动区内的电线种类、数量以及个体死亡地点到最近电线的距离进行计算。活动面积的评估工作在ArcMap中进行,电线种类的识别以及数量计算依据Tracker Client软件和实地考察共同完成。黑颈鹤死亡后到被移动间的时长、第一次被移动后距死亡点的距离以及死亡点距夜宿地的距离也在Tracker Client软件中计算(黑颈鹤死亡后两相邻时间的位点间距离大于20 m即认为黑颈鹤残骸被移动)。本研究将当年出生直到第二年春季与亲鸟分开前的黑颈鹤定义为幼鸟,与亲鸟分开后直到繁殖前的黑颈鹤定义为亚成体。

采用普通最小二乘法(ordinary least squares)对黑颈鹤种群中不同年龄阶段个体数量随年份的变化趋势进行线性拟合。本实验线性模型包含了简单线性回归、二次多项式回归以及三次多项式回归。对黑颈鹤幼鸟、亚成体、成体数量以及总数均进行这三种拟合,依据拟合度 R^2 、调整 R^2 以及P值判断哪种回归模型更符合黑颈鹤种群数量的变化趋势。模型在R软件中建立。在SPSS中应用Pearson简单相关分析对2013至2020年三个年龄阶段黑颈鹤数量之间的相关性进行分析。

2 结果

2.1 黑颈鹤迁徙及越冬地死亡情况

2018 年夏季环志的个体中, 有 1 只个体由于出生较晚, 没能飞离繁殖地, 其他 9 只个体均于当年冬季抵达越冬地。2019 年, 共环志 6 只个体, 并于当年全部抵达越冬地。2018 年达到越冬地的 9 只个体中有 5 只个体最后存活, 其中 3 只个体在 2019 年春季返回盐池湾度夏, 1 只个体度夏于青海玉树索加乡附近, 另外 1 只个体跟踪器发生故障, 最后信号定位于青海海西蒙古族藏族自治州大柴旦。跟踪数据显示, 大柴旦是盐池湾黑颈鹤种群迁徙过程中重要的停歇地, 该个体也很有可能返回盐池湾度夏。

实地调查与跟踪数据表明, 2018 年抵达越冬地的 9 只幼鸟中有 4 只个体撞击电线死亡。2019 年环志的 6 只个体中有 5 只个体撞击电线死亡。9 个死亡位点有 8 个分布在林周县城以西的河谷地带 (图 1), 1 个位于林周县东侧的

唐嘎乡 (图中未标出), 死亡位点均分布在电线附近。对黑颈鹤发生撞击前 6 h 内的活动面积分析显示, 其活动范围内均有电线出现, 黑颈鹤撞击前均与电线发生过相互作用 (表 1)。软件监测与现场确认显示, 农田是黑颈鹤发生撞击的主要场所, 清晨与傍晚是撞击的高发时间段, 黑颈鹤发生撞击的日期、时间、日出与日落时间以及撞击点生境类型见表 2。

死亡的黑颈鹤中有 3 只个体的跟踪器在其死亡后随即被志愿者回收, 这 3 只个体死亡后没有发生明显的移动, 而其他 6 只个体在死亡后均被移动。黑颈鹤残骸在 (15.17 ± 18.50) h ($2 \sim 39$ h, $n = 6$) 被移动。第一次被移动后的地点到死亡地点距离 (176.83 ± 365.00) m ($50 \sim 780$ m, $n = 6$, 移动距离小于 50 m 的按 50 m 计算)。死亡点距离夜宿地平均 (4.96 ± 1.31) km ($n = 9$)。图 2 为被移动后掩埋的黑颈鹤残骸以及发生撞击的地点。

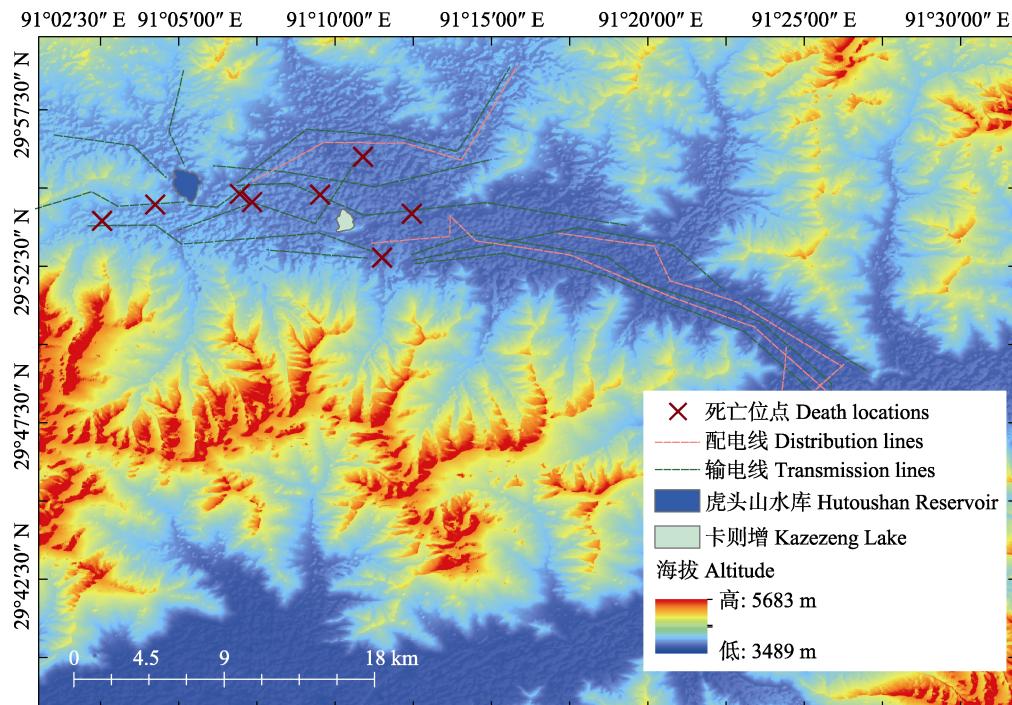


图 1 林周县内黑颈鹤死亡位点

Fig. 1 The death locations of the Black-necked Crane in Linzhou

表 1 黑颈鹤发生撞击前的活动区面积以及活动区域内的电线数量

Table 1 The area of active area before collision and the power line number in the area

个体编号 Individual number	活动区面积 Area of active area (hm ²)	输电线数量 Transmission line number	配电线数量 Distribution line number	死亡点到最近电线的距离 Distance between death location and the nearest power line (m)
1	1 068.04	2	6	15
4	8.06	0	1	215
5	13.41	1	1	86
6	16.92	0	2	24
11	0.90	0	1	419
12	110.26	1	1	475
13	3.23	3	0	336
14	92.63	1	0	87
15	301.46	0	1	72

表 2 撞击信息以及日出、日落时间

Table 2 Collision information and sunup, sunset time

个体编号 Number	撞击日期 (年-月-日) Collision date (Year-month-date)	撞击时间 Collision time	日出时间 Sunup time	日落时间 Sunset time	生境类型 Habitat type
1	2019-02-03	21:00 ~ 22:00	08:43:53	19:33:33	农田 Cropland
4	2018-11-27	18:00 ~ 19:00	08:29:36	18:55:27	农田 Cropland
5	2019-03-05	16:00 ~ 17:00	08:16:37	19:56:25	农田 Cropland
6	2019-02-22	16:00 ~ 17:00	08:28:16	19:48:40	湿地 Wetland
11	2020-01-15	19:00 ~ 20:00	08:51:19	19:17:00	农田 Cropland
12	2020-01-31	11:00 ~ 12:00	08:45:48	19:30:47	农田 Cropland
13	2020-02-24	2:00 ~ 3:00	08:26:30	19:49:57	农田 Cropland
14	2019-11-29	10:00 ~ 11:00	08:31:02	18:55:09	农田 Cropland
15	2020-01-28	9:00 ~ 10:00	08:47:21	19:28:12	农田 Cropland

2.2 线性模型拟合

盐池湾黑颈鹤种群 3 个年龄阶段的个体数量及总数随时间的变化趋势见图 3, 各拟合主要参数见表 3。各年龄阶段黑颈鹤数量之间的相关性分析结果见表 4。模型拟合的结果显示, 除成年个体外, 其余年龄阶段个体数量及总数均呈上升趋势。拟合度及显著性参数显示, 模型拟合的效果良好。相关性分析的结果显示, 亚成体数量与幼鸟数量之间有着较强的正相关性, 幼鸟数量的波动可以较明显地影响亚成体的数量。

3 讨论

在不丹的黑颈鹤越冬地, Choki 等 (2011) 证实了金钱豹 (*Panthera pardus*) 会捕食黑颈

鹤。然而, 在黑颈鹤的主要分布区中国, 金钱豹的总数不超过 50 只, 且分布分散 (Laguardia 2015), 由此可见金钱豹在中国对黑颈鹤的威胁并不大。本调查结果显示, 盐池湾黑颈鹤幼鸟抵达越冬地后死亡的主要原因是撞击电线, 尚未发现比撞击电线更明显的其他威胁。

撞击死亡的 9 只个体中有 8 只个体的撞击发生在农田。这 9 只个体除 14 号以外, 均夜宿于虎头山水库、卡则增, 觅食于农田。本研究根据分析显示, 黑颈鹤往来于夜宿地和觅食地的飞行路线与电线在空间上有很多交集, 这大大增加了撞击风险。鹤类会在清晨和傍晚有规律地往来于夜宿地和觅食地, 暗淡的光线也可能会增加撞击风险。程雅畅 (2015) 参照以往对鹤类节律行为的研究结果, 将日出前 2 h 至



图 2 黑颈鹤的死亡地点以及被食肉动物掩埋的残骸

Fig. 2 The death location of the Black-necked Crane and remains buried by carnivores

a、c、d 为被肉食动物掩埋的残骸，b 为黑颈鹤的死亡地点之一。

The pictures a, c and d are the remains buried by carnivores. The picture b is one of the death locations of the Black-necked Crane.

日出后 2 h 定义为清晨，日落前 2 h 至日落后 2 h 定义为黄昏。按照此种定义方式，本研究记录的撞击电线死亡的黑颈鹤中 4、11、14 和 15 号 4 只个体的撞击均发生在清晨或黄昏，因此暗淡的光线以及鹤形目鸟类的昼夜节律（circadian habits）习性可能是导致黑颈鹤幼鸟撞击频发的重要因素。

有研究表明，赤颈鹤 (*G. antigone*) 的亚成体要比成年个体的撞击风险更高 (Sundar et al. 2005)。Crivelli 等 (1988) 研究显示，撞击电线死亡的卷羽鹈鹕 (*Pelecanus crispus*) 中未成年个体占 93%，其中，幼鸟占 69%。所有盐池湾种群黑颈鹤的撞击事件均发生在环志当年的越冬季节，2018 年夏季环志并在 2018 至 2019

年越冬季存活的 5 只个体在 2019 至 2020 年越冬季无一死亡。本研究结果可以初步判断，飞行经验不足以及对电线分布的不了解是导致黑颈鹤幼鸟死亡的重要因素。根据实地观察，黑颈鹤幼鸟起飞时总是位于亲鸟后方，这样的飞行方式可能会阻挡幼鸟的视线。黑颈鹤喜欢群居齐飞这一特点也进一步限制了幼鸟在飞行时的视野范围。

强风会削弱鸟类的飞行控制能力 (Savereno et al. 1996)，从而增加撞击风险。2019 和 2020 年连续两年在林周县的实地考察中发现，林周县的河谷地带风力强劲，这对于飞行技术不佳的幼鸟而言也是一个导致撞击的可能原因。孔德军 (2008) 的研究表明，云南

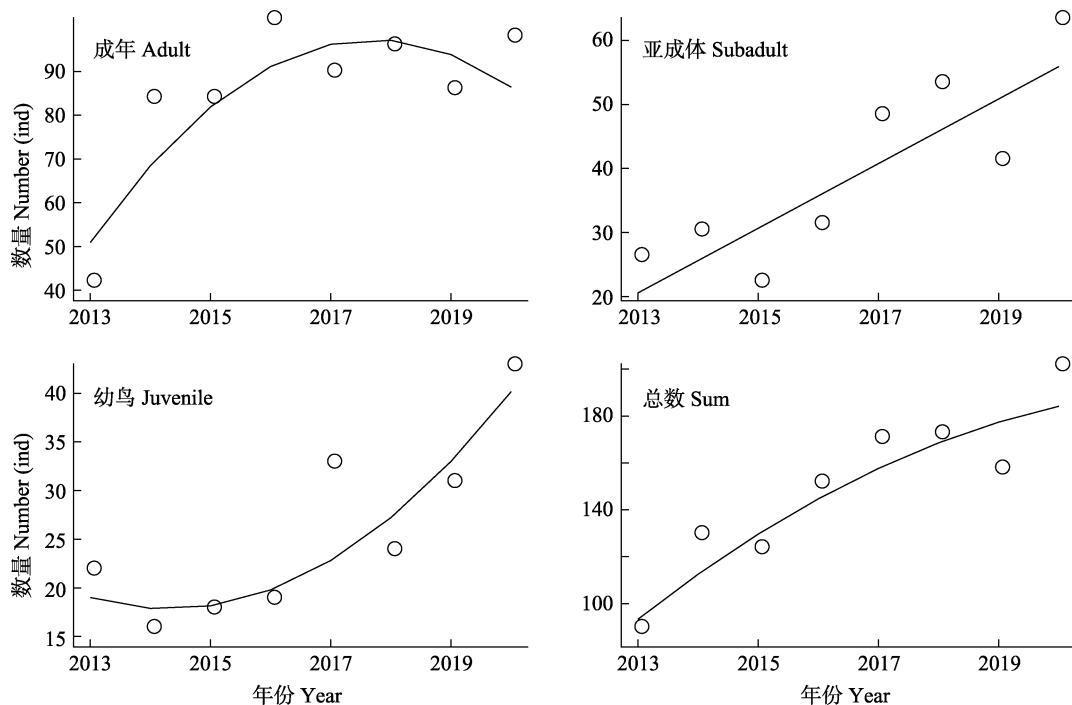


图3 盐池湾黑颈鹤种群数量变化趋势

Fig. 3 The population number change trend of Black-necked Crane in Yanchiwan

表3 线性模型主要参数

Table 3 The Main parameters of linear model

	拟合度 R^2 Goodness of fit	调整后的 R^2 Adjusted goodness of fit	显著性 Significance
成体 Adult	0.737	0.632	0.036
亚成体 Subadult	0.733	0.689	0.007
幼鸟 Juvenile	0.779	0.691	0.016
总数 Sum	0.862	0.806	0.007

表4 黑颈鹤各年龄阶段数量间的相关性

Table 4 Correlation between the number of Black-necked Crane at all ages

	相关系数 Correlation coefficient		
	成体 Adult	亚成体 Subadult	幼鸟 Juvenile
成体 Adult	1	0.508	0.257
亚成体 Subadult		1	0.845
幼鸟 Juvenile			1

大山包国家级自然保护区内黑颈鹤撞击电线均发生在持续的大雾天气里。通过实地考察和走访牧民发现, 林周县冬季干燥无雾, 所以风力可能是导致撞击的主要气候因素。

每年藏历的腊月 29 和正月初一(一般在公历 2 月) 分别是藏族人的传统节日古突节和藏历新年, 藏族人会连续几日在夜晚举行各种活动, 其中, 环绕住宅燃放爆竹驱鬼辟邪的习俗对黑颈鹤的干扰不可忽视。环志个体中的夜宿地距离居民区的最小距离不足 1 km。跟踪数据显示, 黑颈鹤的活动时间均集中在白天, 夜晚极少活动。然而, 1 号个体于 2019 年 2 月 3 日(当年藏历的古突节) 的 20:00~21:00 时在夜宿地起飞, 于 21:00~22:00 时之间与配电线发生撞击后随即死亡。13 号个体于 2020 年 2 月 24 日(当年藏历新年) 的 2:00~3:00 时之间由夜宿地起飞, 与输电线发生撞击后受伤但未死亡, 在彭波曲过夜, 该个体最终在 2 月 28 日死

亡。上述情况死亡的黑颈鹤不仅会有幼年个体，成体以及亚成体可能也占一定比例，因而限制避免类似的惊扰活动可以有效降低撞击死亡率。

潜在的回避行为 (avoidance behaviour) 可能是输电线路对黑颈鹤的又一消极影响。对越冬于北美大平原中部及南部的沙丘鹤 (*G. canadensis*) 的研究表明，沙丘鹤对风力发电装置可能存在回避行为，而回避行为会导致沙丘鹤对栖息地的利用程度降低 (Pearse et al. 2016)。同样栖息在北美大平原的草原松鸡 (*Tympanuchus cupido*) 和小草原松鸡 (*T. pallidicinctus*) 对电线也有回避行为，两个物种的活动范围会与电线保持至少 100 m 的距离，这提高了栖息地进一步破碎化的可能性 (Pruett et al. 2009)。如果回避行为确实存在，那么输电线路对黑颈鹤的直接影响将不仅仅停留在越冬幼鸟，影响也会延伸至黑颈鹤的其他年龄阶段。输电线路会在空间上对黑颈鹤的越冬栖息地进行分割从而导致栖息地破碎化，如果与回避行为相叠加则会进一步降低环境容纳量 (carrying capacity)，甚至影响到黑颈鹤越冬期的能量储备和后续的迁徙与繁殖。

黑颈鹤种群的数量变化可能受到多种因素的影响。短期内的气候改变以及繁殖地、越冬地保护工作的加强都对黑颈鹤的种群数量有所助益 (Farrington et al. 2013, Han et al. 2018)。模型拟合的结果显示，盐池湾种群黑颈鹤的总体数量呈现上升趋势，但增长速率在逐年减小。总体上看，似乎幼鸟在越冬地的撞击死亡并未严重影响到盐池湾黑颈鹤种群数量的增长趋势。自 2018 起盐池湾黑颈鹤种群成体的数量开始出现下降趋势，但亚成体及幼鸟数量一直呈现上升趋势。相关性分析的结果显示，盐池湾黑颈鹤亚成体与幼鸟数量之间较之于亚成体与成体数量之间有着更强的正相关关系，繁殖地幼鸟存活率的不断升高使得亚成体数量并未因越冬地幼鸟的高死亡率受到严重影响。然而，自 2014 起林周县陆续成立 5 家电网公司，仅

2018 年就有两家公司成立，林周县的电网建设工作正在逐步加强。2018、2019 连续两年的环志工作也揭示了黑颈鹤幼鸟在越冬地 60% 的总死亡率。繁殖地幼鸟数量的增长会在一定程度上减缓其在越冬地死亡率高的消极影响，但如果越冬地主要致危因素无法消除，从长远来看该种群仍可能受到严重影响。

4 保护建议

电线入地是消除黑颈鹤越冬撞击风险的最有效方法。对于配电线，建议直接采取入地处理，而对于入地成本和风险都较高的输电线，加装警示装置可以有效降低撞击风险 (Brown et al. 1995)。Barrientos 等 (2011) 的研究显示，警示装置可以减少 55% ~ 94% 的鸟类撞击。实际上警示装置的效果受到周围环境、目标物种以及装置本身特性等多种因素的影响 (Jenkins et al. 2010)，因此保护管理者可以采取实验的方式筛选出效果最理想的警示装置。

随着林周县经济建设的逐步加快，电网扩建工作还会继续，因此合理的路线规划成为了降低黑颈鹤撞击风险的另一种有效途径。新建的电线应该避开黑颈鹤的越冬聚集分布地，同时也要避免与黑颈鹤的飞行路线有重叠，在此基础上对电线安装警示装置，警示效果将大大提升。撞击电线风险的大小其实与电线本身的结构特点也有很大关联，尤其是电线垂直方向上的层数以及每层电线之间的跨度 (Bevanger 1994, Jenkins et al. 2010)。Bevanger 等 (2001) 研究显示，当配电线层数由两层减到一层之后柳雷鸟 (*Lagopus lagopus*) 和岩雷鸟 (*L. mutus*) 的撞击死亡率大幅下降。所以新建的电线应尽量简化其结构以降低撞击风险。

在林周越冬地，当地管理机构为了确保黑颈鹤种群健康，常常投食。建议清晨在虎头山水库和卡则增定时定点进行投喂活动，这样可以有效减少黑颈鹤与电线的相遇次数，从而降低撞击风险。投食地点要多且分散，以防止黑颈鹤大规模集群，飞行时相互遮挡视线而发生

撞击。藏族人民在古突节与藏历新年的夜里举行的各种活动会对黑颈鹤产生严重干扰，但藏族人将黑颈鹤视为神鸟，如果与当地藏族人民良好沟通，可以有效地减少该种干扰。

撞击电线已经成为大型鸟类面临的主要威胁之一。若能在设计线路和加装警示装置上早做考虑，一定会减少对鸟类的威胁。建议林业和草原主管部门，依据相关法律对电力、通讯等部门提出有关设计和施工上的建议与要求，在源头上杜绝威胁鸟类生存的工程，并尽快对影响较大的原有输电线路进行合理改造。

致谢 感谢国家林业和草原局、甘肃林业和草原局、西藏林业和草原局给予的支持。感谢甘肃盐池湾国家级自然保护区管理局、西藏雅鲁藏布江中游河谷黑颈鹤国家级自然保护区管理局在野外工作中给予的全力支持。感谢西藏林周卡东村护林员旦增先生及其家人，以及盐池湾各保护站监测人员在野外工作中给予的帮助。

参 考 文 献

- Barrientos R, Alonso J C, Ponce C, et al. 2011. Meta-analysis of the effectiveness of marked wire in reducing avian collisions with power lines. *Conservation Biology*, 25(5): 893–903.
- Bevanger K. 1994. Bird interactions with utility structures: collision and electrocution, causes and mitigating measures. *Ibis*, 136(4): 412–425.
- Bevanger K, Brøseth H. 2001. Bird collisions with power lines—an experiment with ptarmigan (*Lagopus* spp.). *Biological Conservation*, 99(3): 341–346.
- Brown W M, Drewien R C. 1995. Evaluation of two power line markers to reduce crane and waterfowl collision mortality. *Wildlife Society Bulletin*, 23(2): 217–227.
- Choki T, Tshering J, Norbu T, et al. 2011. Predation by leopards of Black-necked Cranes *Grus nigricollis* in Bhutan. *Forktail*, 27: 117–119.
- Crivelli A J, Jerrentrup H, Mitchev T. 1988. Electric power lines: a cause of mortality in *Pelecanus crispus* Bruch, a world endangered bird species, in Porto-Lago, Greece. *Colonial Waterbirds*, 11(2): 301–305.
- Desholm M, Kahlert J. 2005. Avian collision risk at an offshore wind farm. *Biology Letters*, 1(3): 296–298.
- Farrington J D, Xiulei Z. 2013. The Black-necked Cranes of the Longba National Nature Reserve, Qinghai, China. *Mountain Research and Development*, 33(3): 305–313.
- Ferrer J M, Miguel F. 2000. Common Crane and Great Bustard collision with power lines: collision rate and risk exposure. *Wildlife Society Bulletin*, 28(3): 675–680.
- Ferrer M, Castroviejo R J. 1991. Electrocution of raptors on power pines in Southwestern Spain. *Journal of Field Ornithology*, 62(2): 181–190.
- Han X, Huettmann F, Guo Y, et al. 2018. Conservation prioritization with machine learning predictions for the Black-necked Crane *Grus nigricollis*, a flagship species on the Tibetan Plateau for 2070. *Regional Environmental Change*, 18(7): 1–10.
- Jenkins A R, Smallie J J, Diamond M. 2010. Avian collisions with power lines: a global review of causes and mitigation with a South African perspective. *Bird Conservation International*, 20(3): 263–278.
- Li F, Bishop M A, Drolma T. 2011. Power line strikes by Black-necked Cranes and Bar-headed Geese in Tibet Autonomous Region. *Chinese Birds*, 2(4): 167–173.
- Malcolm J M. 1982. Bird collisions with a power transmission line and their relation to botulism at a Montana Wetland. *Wildlife Society Bulletin*, 10(4): 297–304.
- Pearse A T, Brandt D A, Krapu G L. 2016. Wintering Sandhill Crane exposure to wind energy development in the central and southern Great Plains, USA. *The Condor: Ornithological Applications*, 118(2): 391–401.
- Pruett C L, Patten M A, Wolfe D H. 2009. Avoidance behavior by Prairie Grouse: implications for development of wind energy. *Conservation Biology*, 23(5): 1253–1259.
- Savereno A J, Savereno L A, Boettcher R, et al. 1996. Avian behavior and mortality at power lines in coastal South Carolina. *Wildlife Society Bulletin*, 24(4): 636–648.
- Sundar K S G, Choudhury B C. 2005. Mortality of sarus cranes (*Grus antigone*) due to electricity wires in Uttar Pradesh, India. *Environmental Conservation*, 32(3): 260–269.

- Wang Z, Guo Y, Dou Z, et al. 2020. Autumn migration route and stopover sites of Black-necked Crane breeding in Yanchiwan Nature Reserve, China. *Waterbirds*, 43(1): 93–99.
- 程雅畅. 2015. 基于 GPS 遥测的江西鄱阳湖越冬白枕鹤 (*Grus vipio*) 活动区和栖息地选择研究. 北京: 北京林业大学硕士学位论文.
- 孔德军. 2008. 云南大山包黑颈鹤 (*Grus nigricollis*) 越冬行为和保护研究. 昆明: 中国科学院昆明动物研究所硕士学位论文.
- Laguardia A. 2015. 中国金钱豹 (*Panthera pardus*) 的分布、现状与监测策略. 北京: 北京林业大学硕士学位论文.
- 李凤山, 杨晓君, 杨芳. 2005. 云贵高原黑颈鹤的现状及保护. 昆明: 云南民族出版社, 44–56.
- 色拥军, 窦志刚, 杨巨才, 等. 2020. 甘肃盐池湾黑颈鹤繁殖分布格局. *湿地科学与管理*, 16(1): 64–68.
- 王述潮, 马鸣. 2019. 卫星跟踪猎隼失联案例分析. *动物学杂志*, 54(1): 1–7.
- 杨乐, 李继荣, 仓决卓玛. 2016. 西藏“一江两河”流域越冬黑颈鹤种群数量及分布. *东北林业大学学报*, 44(5): 70–72, 83.