

天津区域鸟类活动的双偏振天气 雷达回波分析

赵子杭¹ 庄庭¹ 李建勇^{2,6} 李春^{3,4} 李宗飞⁵ 许崇海¹ 史静¹

1 天津气象雷达研究试验中心, 天津 300061

2 中国气象局气象探测中心, 北京 100081

3 天津市气候中心, 天津 300074

4 天津市北辰区气象局, 天津 300400

5 天津市气象信息中心, 天津 300074

6 广东省气象数据中心, 广东 510080

提 要: 利用 2022 年 6 月-2023 年 3 月的宝坻 CINRAD/SA 双偏振天气雷达资料, 对探测到的天津区域空中生物活动进行分析, 结果表明: 天津区域空中生物活动存在明显的季节变化和日变化。雷达能够探测到的候鸟迁徙回波集中在 2 月下旬到 11 月下旬, 其中湿地鸟类活动在夏季较为明显, 候鸟迁徙活动在 2 月、11 月份特别频繁, 鸟类回波出现的时刻与日出日落有明显的关联。其中, 秋季鸟类活动特征较为明显, 回波在反射率产品上呈现明显的类圆形特征, 回波强度能达到 35 dBz 以上; 从径向速度产品上可以看出, 鸟类飞行时径向速度约在 10-27 m/s; 从相关系数 (CC) 产品上看, 鸟类回波的相关系数整体数值较低, 主要分布在 0.1~0.8; 从差分反射率 (Z_{DR}) 产品上看, 差分反射率分布不均匀, 最大可达 3~5 dB。相比于单偏振天气雷达, S 波段双偏振天气雷达对空中生物回波的识别有显著的优势。

关键词 S 波段双偏振天气雷达; 鸟类回波; 回波强度; 相关系数; 差分反射率

Analysis of dual-polarization weather radar echoes of bird activity in Tianjin area

ZHAO Zihang¹, ZHUANG Ting¹, LI Jianyong^{2,6}, LI Chun^{3,4}, LI Zongfei⁵,
XU Chonghai¹, SHI Jing¹

1 Tianjin Meteorological Radar Research & Test Centre, Tianjin 300061

2 Meteorological Observation Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

3 Tianjin Climate Center, Tianjin 300074

4 Beichen Meteorological Observatory of Tianjin, Tianjin 300400

通信作者: 庄庭, 主要从事综合气象探测相关工作, 邮箱: worldstar8@163.com;

第一作者: 赵子杭, 主要从事综合气象探测相关工作, 邮箱: 648112865@qq.com。

Abstract: We used Baodi CINRAD/SA dual-polarization weather radar data from June to March to analyze airborne biological activity in Tianjin area. The results show that there are obvious seasonal differentiation and diurnal variation of airborne biological activity in Tianjin area. The migration echoes of migratory birds detected by radar were concentrated from late February to late November, among which wetland bird activity was more obvious in summer, and migratory bird activity was particularly frequent in February and November. The time of bird echo appeared was obviously correlated with sunrise and sunset. The echoes of birds show obvious circular characteristics in the reflectivity products, and the echo intensity can reach more than 35 dBz. It can be seen from the Radial velocity product that the flight speed of birds is about 10-27 m/s; From the product of correlation coefficient (CC), the overall correlation coefficient of bird echo is low, and the correlation coefficient is mainly distributed in 0.1~0.8. From the difference reflectivity (Z_{DR}) products, the differential reflectivity distribution is not uniform, up to 5~5 dB. Compared to single polarization weather radar, S-band dual-polarization weather radar has significant advantages in the recognition of airborne biological echoes.

Keywords: S-band dual-polarization weather radar; bird echo; echo intensity; correlation coefficient; differential reflectivity

引言

随着气象事业的迅猛发展, S 波段天气雷达在国内的布网率越来越密集, 其在短临预警以及防灾减灾中的作用越来越明显(王函等, 2022; 张哲等, 2023; 韩颂雨等, 2022)。CINRAD/SA 型号天气雷达最主要的功能就是探测降水回波的分布与强度的变化情况, 但同时也会探测到一些非降水回波, 如地物回波、海浪回波、昆虫和鸟的回波、大气折射指数脉动引起的回波等(俞小鼎等, 2006; 刘娟, 2015; 张林等, 2014)。S 波段双偏振天气雷达因良好的性能以及具有丰富的双偏振产品(潘佳文等, 2023), 使其在空中生物回波的识别上有显著的优势, 同时对生物回波展开研究也有助于提高雷达数据质量(李林等, 2022; 席宝珠等, 2013; 张林等, 2021; 陈唯实等, 2023)。美国气象学家(Gauthreaux and Belser, 1998)通过研究发现, 天气雷达可以观测到鸟类的长距离迁徙和局地活动, 可以运用天气雷达开展鸟类生物学研究。Zrníc and Ryzhkov (1998) 和 Hubbert et al (2018) 分析还表明大规模的鸟类活动对天气雷达探测质量会产生一定的影响, 雷达生物学研究有一定的必要性。国内专家学者利用天气雷达对空中生物识别展开研究, 发现空中生物活动与气象条件密切相关。贾金明等(2007)通过研究发现棉铃虫发生程度与多个气象因子关系紧密, 并根据棉铃虫繁殖特点, 对应不同繁殖阶段建立了预报模式; 李丰等(2012)利用卫星和地面资料对非气象回波展开研究, 并提出基于模糊逻辑和回波分块的非气象回波识别方法; 张林和杨洪平(2018)利用反射率因子、差分反射率因子和相关系数对生物回波识别技术展开研究, 最终

非降水回波识别率达到 93%以上；滕玉鹏等（2020）利用低通滤波的方法，对雷达的多普勒速度进行处理，有效区分了生物回波和气象回波，同时对 2012 年 9 月 30 日的空中生物迁徙过程进行验证，成功分离了鸟类与虫类回波；姚文等（2022）通过营口单、双偏振天气雷达对辽河三角洲及附近湿地鸟类活动展开研究，发现鸟类活动存在明显的季节变化和明显的日变化，进一步提高了天气雷达在生物气象学上的应用能力。鸟类回波是 S 波段天气雷达上最常见的空中生物回波（朱轶明等，2022；Anjita and Indu, 2023；Lukach et al, 2022），鸟类的体型优势加上成群后的规模优势，在天气雷达上容易捕捉到鸟类的活动，特别是黎明时的集体出巢觅食以及黄昏时刻的候鸟大批迁徙，在 S 波段天气雷达上可以明显地看到鸟类活动的轨迹以及相关回波变化。

天津地区水文资源丰富，生态环境良好，每年都有大批冬候鸟、夏候鸟经过，同时具有北大港湿地、七里海湿地、大黄堡湿地等多处湿地保护区，具有丰富的生物资源（肖欢等，2021；柴子文等，2020；孙嘉徽，2020；张宇硕等，2021；尤平等，2003）。宝坻 S 波段双偏振天气雷达于 2022 年 6 月投入试运行，并于 2023 年 1 月正式运行。该雷达位于天津市宝坻区，雷达采用 VCP 体扫模式，利用运行以来的双偏振天气雷达资料（Stepanian et al, 2016；钟谢非等，2023），对天津地区的生物活动特征与规律进行分析，利用双偏振天气雷达的回波形态结合植保部门关于天津区域生物的观测信息进行判断，发现生物活动回波特征不同于降水回波，活动时间、活动地点、活动方式等具有明显的规律性。

1 秋季鸟类迁徙活动回波特征分析

1.1 监测实况

根据津云新闻报道，2022 年 11 月 26 日，在天津市滨海新区北塘街道宁车沽区域，天津市生态环境监测中心多名监测人员和天津科技大学数位老师在开展市生态环境局生物多样性调查监测项目时，观测到 2000 余只东方白鹳。

1.2 雷达监测结果

2022 年 11 月 25 日下午 17-19 点，宝坻 S 波段双偏振天气雷达捕捉到由蓟州于桥水库向滨海方向有回波移动，随即对这次回波展开分析。从宝坻雷达 0.5° 仰角反射率随时间变化特征来看（图 1），17: 22-17: 37 雷达上开始出现少量斑块状回波，强度在 10-20 dBz 左右，略强于周围的晴空回波；17: 37-17: 43 回波面积增大，强度明显加强，达到 20~35 dBz；17: 43-18: 04 回波面积迅速增大，强度有所减弱，约为 30 dBz；18: 04-18: 30 回波由宝坻向宁河移动，回波中心向东南方向偏移，强度在 15-30 dBz 左右；18: 30-18: 36 部分回波在宁车沽区域消失。18: 36-19: 06 剩余回波由东丽-滨海交界处向津南-滨海交界处

移动，且反射率因子强度逐渐下降；19: 06 以后回波彻底消失。

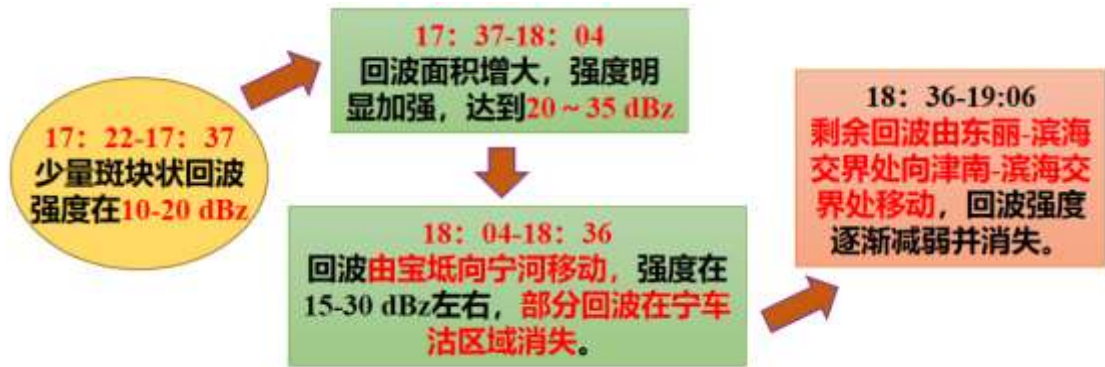


图 1 2022 年 11 月 25 日反射率产品随时间变化特征

Figure 1 Time dependent characteristics of reflectivity products on November 25, 2022

结合 2022 年 11 月 25 日 17: 48 宝坻 S 波段双偏振天气雷达 0.5° 仰角反射率因子、径
向速度、差分反射率、相关系数（图 2）展开分析。从径向速度特征来看，从初始时刻到回
波消失共持续 1 h 40 min 左右。由雷达径向速度图可以看到，鸟的飞行径向速度约在 10-27m/s
（与樊淑娟（2020）利用卫星追踪到的东方白鹳每日飞行速度相符）。从相关系数特征来看，
鸟类回波的相关系数整体数值较低，主要分布在 0.1~0.8。从差分反射率特征来看，此次过
程中差分反射率最大可达 3~5 dB。与东方白鹳体型特征比较相符（体长为 1.1-1.28 米，翼
展约 2.2 米）。从宝坻雷达 0.5° 仰角反射率剖面来看（图 3），候鸟飞行高度大约在 1000
米左右。

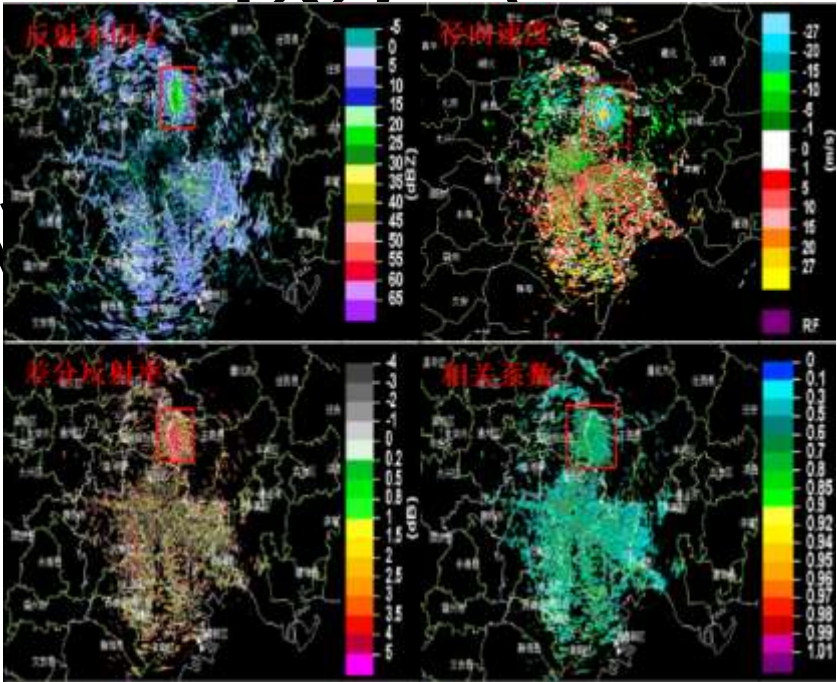


图 2 2022 年 11 月 25 日 17:48 宝坻 S 波段双偏振天气雷达 0.5° 仰角反射率因子、径向速度、差分反射率、
相关系数产品图

Figure 2 Product diagram of 0.5° elevation reflectivity factor, radial velocity, differential reflectivity and

correlation coefficient of Baodi S band dual-polarization weather radar at 17:48 on November 2, 2022

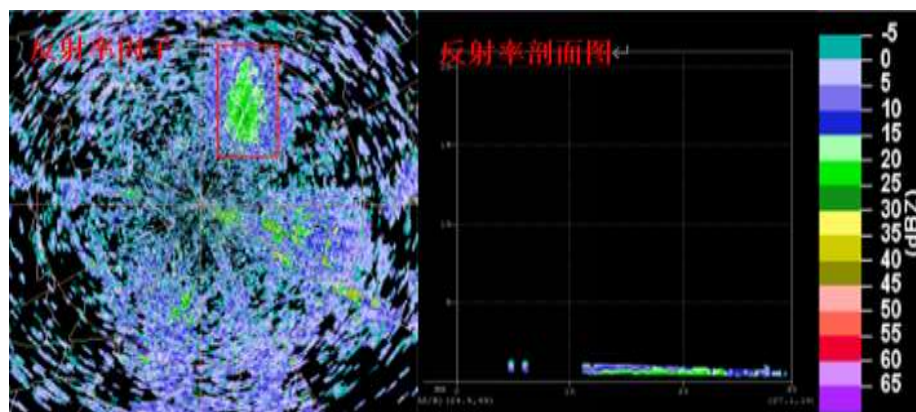


图3 2022年11月25日17:48宝坻S波段双偏振天气雷达0.5°仰角反射率剖面图

Figure 3 Profile of 0.5° elevation reflectivity of Baodi S band dual-polarization weather radar at 17:48 on November 25, 2022

从2022年11月25日天津地区候鸟迁徙路线来看(图4),总体迁徙路线为蓟州--唐山玉田--宝坻--宁河--滨海新区--东丽--津南,由回波情况可推知,在宁车沽区域有部分候鸟落下,其余继续向南飞行,至津南滨海交界处回波消失。



图4 2022年11月25日天津地区候鸟迁徙情况

Figure 4 Migration of migratory birds in Tianjin on November 25, 2022

2 夏季鸟类局地活动回波特征分析

2.1 监测实况

根据中国科学院西北生态环境资源研究院、津云新闻与鸟类爱好者在网站提供的数据,每年七、八月有大量夏候鸟在天津大黄堡湿地(天津市武清区大黄堡线与大黄堡路交叉口东50米)、七里海鸟类保护区(宁河区南部)、蓟州山区及水库(蓟州区城东蓟运河左支流州河出口处)、宝坻潮白河及附近农田(宝坻区S101潮白河沿岸)、北大港湿地(滨海新区大港南环路)等地活动,其中包含鹭类、燕鸥类、鸬鹚等多种鸟类。

2.2 雷达监测结果

2022 年 8 月 2 日 5 时，宝坻 S 波段双偏振天气雷达探测到的生物回波主要分布在宁河七里海鸟类保护区、蓟州北部果河、唐山丰南区南部沙河附近。

从宝坻雷达 0.5° 仰角反射率随时间变化特征来看（图 5），4：40 雷达上开始出现少量斑块状回波，强度在 25 dBz 左右，略强于周围的晴空回波；4：44 - 4：59 回波面积增大，强度明显加强，达到 25~35 dBz；4：59-5：15 圆形回波中心向四周扩散，强度有所减弱，在 20-30 dBz 左右，原因可能是鸟类向周围寻找食物，逐渐降落，密度减小；5：15 以后回波逐渐消失（图 6）。



图 5 2022 年 8 月 2 日反射率产品随时间变化特征

Figure 5 Characteristics of reflectivity product over time on August 2, 2022

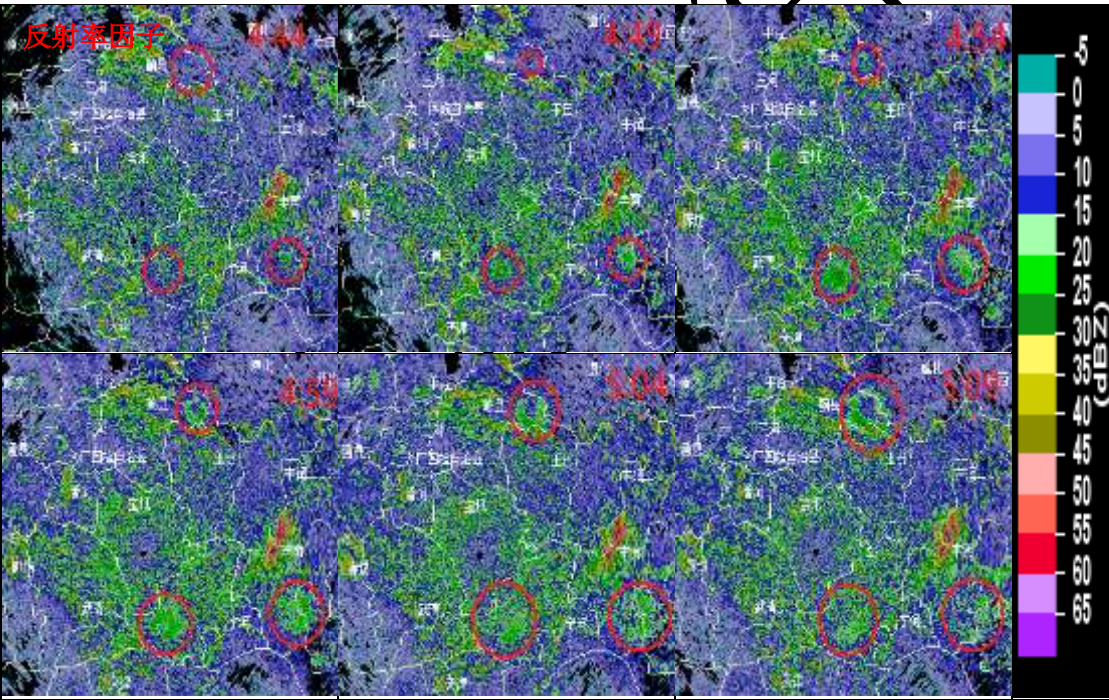


图 6 2022 年 8 月 2 日宝坻 S 波段双偏振天气雷达 0.5° 仰角反射率因子变化情况

Figure 6 Change of 0.5° elevation reflectivity factor of Baodi S band dual-polarization weather radar on August 2, 2022

结合 2022 年 8 月 2 日 5：00 宝坻 S 波段双偏振天气雷达 0.5° 仰角反射率因子、径向速度、差分反射率、相关系数（图 7）展开分析。由雷达径向速度图可以看到，环状回波有正负速度对特征（对称），鸟类飞行的径向速度分别为±(2~10) m/s（天津区域湿地鸟类种类较多（莫训强等，2021），晨起众多鸟类外出寻觅食物，其速度一般不会类似鸟类迁徙过

程以自身的最大乃至极限速度飞行，因而速度偏小）。从相关系数特征来看，鸟类回波的相关系数整体数值较低，主要分布在 0.1~0.8，与文献中提到的相关系数特征相符。从差分反射率特征来看，鸟的飞行方向和个体大小差异性较大，差分反射率分布不均匀，此次过程中差分反射率最大可达 3~5 dB。跟秋季候鸟迁飞不同，没有出现部分区域差分反射率强度大体相同的情况，推测可能是因为鸟类个体小、翅膀短，水平方向与垂直方向上反射率变动不大。

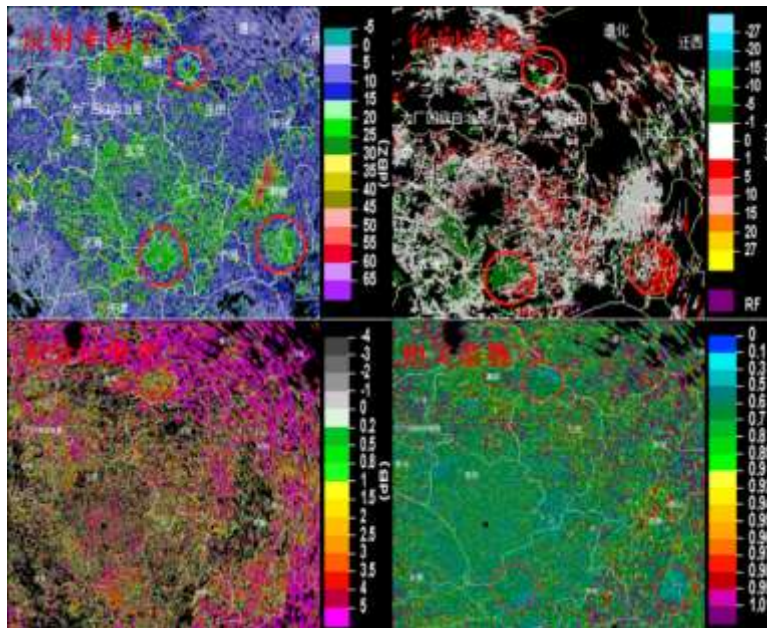


图 7 2022 年 8 月 2 日 5:00 宝坻 S 波段双偏振天气雷达 0.5° 仰角反射率因子、径向速度、差分反射率、相关系数产品图

Figure 7 Product diagram of Baodi S-band dual-polarization weather radar 0.5° elevation reflectivity factor, radial velocity, differential reflectivity and correlation coefficient at 5:00 on August 2, 2022

3 春季鸟类迁徙活动回波特征分析

3.1 监测实况

2023 年 2 月 27 日 18 时 21 分左右，部分市民观察到有大批鸟类在天津市河西区友谊路（天津水晶宫饭店东）自西向东飞过，飞行高度较低，鸟类数量比较多。

3.2 雷达监测结果

2023 年 2 月 27 日下午 18 点左右，宝坻 S 波段双偏振天气雷达捕捉到有生物回波由宁河七里海鸟类保护区、武清大黄堡湿地向宝坻地区移动，随即对这次回波展开分析。从宝坻雷达 0.5° 仰角反射率随时间变化特征来看（图 8），18: 18-18: 30 雷达上开始出现少量斑块状回波，回波强度和范围逐渐增大，达到 45 dBz 左右；18: 30-18: 36 回波面积迅速增大，达到 35 dBz；18: 36-19: 00 回波面积迅速减小，强度逐渐减弱，最终回波消失。

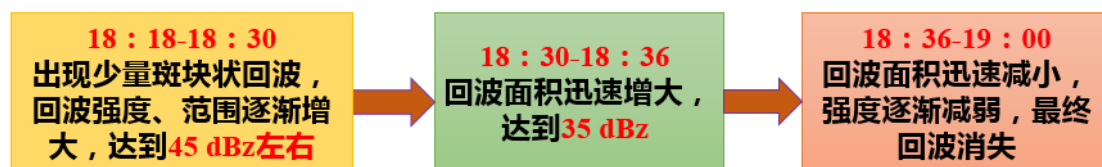


图 8 2023 年 2 月 27 日反射率产品随时间变化特征

Figure 8 Time dependent characteristics of reflectivity products on February 27, 2023

从飞行高度来看，对回波做垂直剖面分析（图 9），候鸟飞行高度约在 200-700 m，强回波中心在 300 m 左右。结合 2023 年 2 月 27 日 18:36 宝坻 S 波段双偏振天气雷达 0.5° 仰角反射率因子、径向速度、差分反射率、相关系数（图 10）展开分析。从径向速度特征来看，从初始时刻到回波消失共持续 1 h 左右。由雷达径向速度图可以看到，径向速度主要分布在 5-15 m/s，部分可达 20-27 m/s（与王松（2021）关于春季鸟类的平均迁徙速度相符）。从相关系数特征来看，回波的相关系数整体数值较低，主要分布在 0.1~0.8。差分反射率分布不均匀，特征不明显。

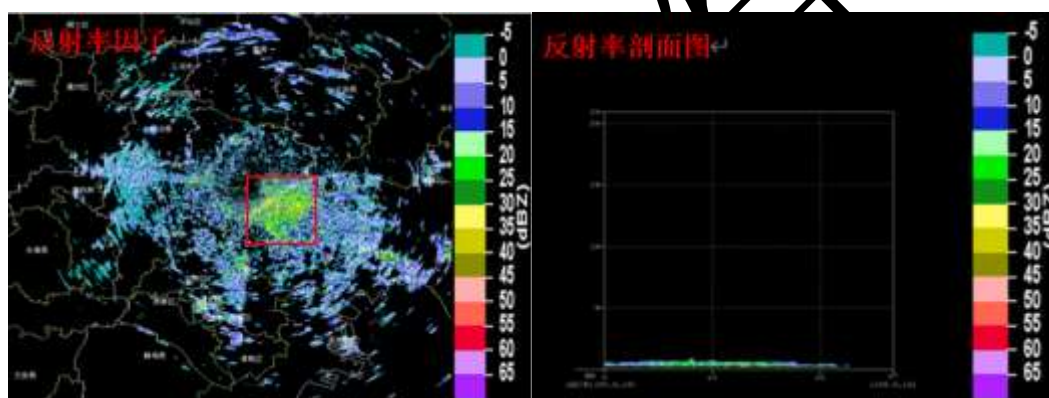
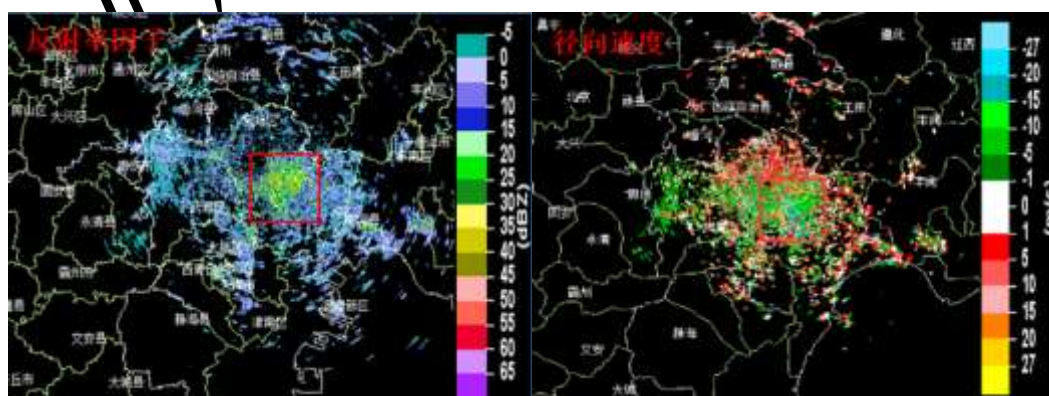


图 9 2023 年 2 月 27 日 18:36 宝坻 S 波段双偏振天气雷达 0.5° 仰角反射率剖面图

Figure 9 Profile of 0.5° elevation reflectivity of Baodi S band dual-polarization weather radar at 18:36 on February 27, 2023



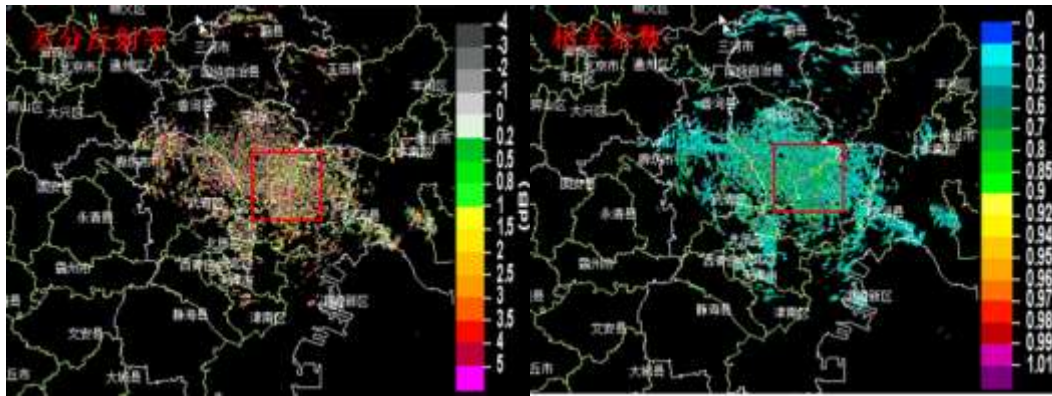


图 10 2023 年 2 月 27 日 18:36 宝坻 S 波段双偏振天气雷达 0.5° 仰角反射率因子、径向速度、差分反射率、相关系数产品图

Figure 10 Product diagram of Baodi S band dual-polarization weather radar 0.5° elevation reflectivity factor, radial velocity, differential reflectivity and correlation coefficient at 18:36 on February 27, 2023

2023 年 2 月 27 日，宝坻 S 波段双偏振天气雷达探测到的生物回波主要由河七里海鸟类保护区、武清大黄堡湿地向宝坻地区移动（图 11）。



图 11 2023 年 2 月 27 日天津地区候鸟迁徙情况

Figure 11 Migration of migratory birds in Tianjin on February 27, 2023

4 鸟类活动特征分析

4.1 秋季鸟类迁徙活动特征

利用宝坻 S 波段双偏振天气雷达 6-12 月的雷达数据，通过分析鸟类回波发现，秋季鸟类每天 17:00 左右开始活动，离巢时间与日落时间有明显的正相关关系（表 1）。由于天气雷达每 6 分钟完成一次体扫数据传输，因此会有 0-6 min 的误差。从鸟类迁徙回波出现到消失，大约持续 2 小时左右。通过统计的几次迁徙过程可以看出，虽然局部有微小差异，但总体迁徙路线为蓟州--唐山玉田--宝坻--宁河--滨海新区（图 12），总体路线与中亚-印度迁

徙路线大致相符。

表 1 典型秋季鸟类远距离迁徙过程

Table 1 Typical long distance migration process of autumn birds

日期	日落时间	离巢时间	天气情况		
2022 年 11 月 04 日	17: 09	17: 51	小雨/多云	13℃/18℃	西北风 2 级
2022 年 11 月 13 日	16: 56	17: 44	阴/阴	13℃/23℃	西南风 2 级
2022 年 11 月 15 日	16: 54	17: 38	多云/小雨	12℃/18℃	北风 1 级
2022 年 11 月 25 日	16: 51	17: 22	多云/晴	2℃/13℃	西北风 3 级

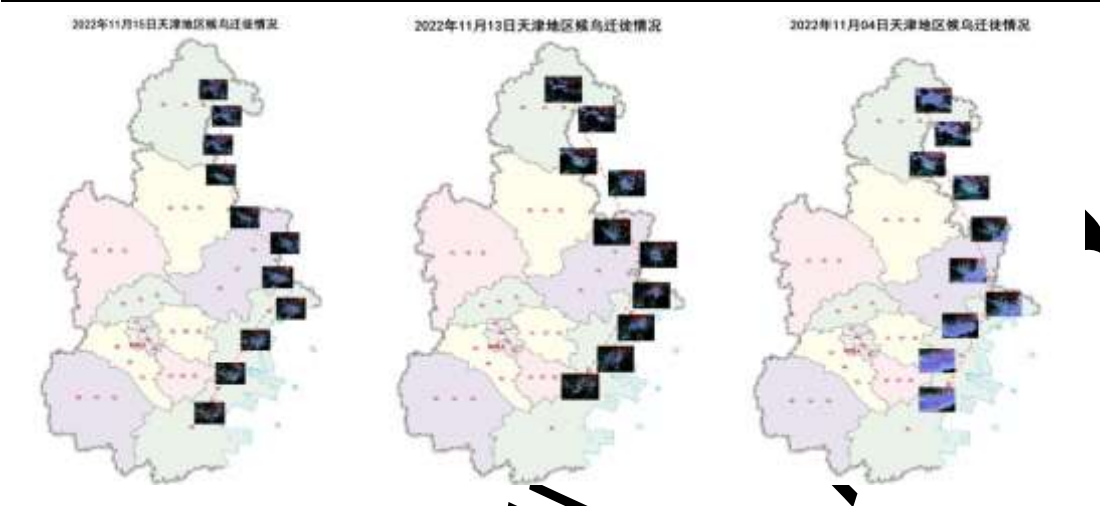


图 12 天津地区秋季候鸟迁徙情况

Figure 12 Autumn migration of migratory birds in Tianjin area

4.2 夏季鸟类局部活动特征

利用宝坻 S 波段双偏振天气雷达运行以来的雷达数据，通过分析鸟类回波发现，夏季鸟类每天 5: 00 左右开始活动（表 2），夏季鸟类活动区域主要在宁河七里海、武清大黄堡湿地自然保护区、宝坻潮白河、箭杆河及附近农田、蓟州于桥水库等地（图 13）。夏季鸟类局地活动时间整体分布在早晨 5 时左右。活动范围一般不超过 30 Km，鸟类离巢活动前期反射率有明显的 C 状或环状特征，中期有明显的空心特征，后期有明显的辐散特征。回波趋势呈现斑状回波-C 状回波-回波扩散-回波消散。径向速度产品有明显的正负对称特征，且飞行径向速度大约在 2-10 m/s，符合鸟类局地觅食活动特征。对夏季局地活动的鸟类来说，差分反射率特征并不明显。

表 2 典型夏季鸟类局地活动过程

Table 2 Typical local activity processes of summer birds

日期	日出时间	离巢时间	天气情况		
7 月 26 日	5: 06	4: 35	晴	25~32℃	东风 2 级
7 月 27 日	5: 07	4: 43	阵雨	25~31℃	北风 1 级
7 月 28 日	5: 08	4: 45	中雨	23~30℃	东北风 1 级
8 月 2 日	5: 12	4: 49	多云	28~35℃	西南风 2 级

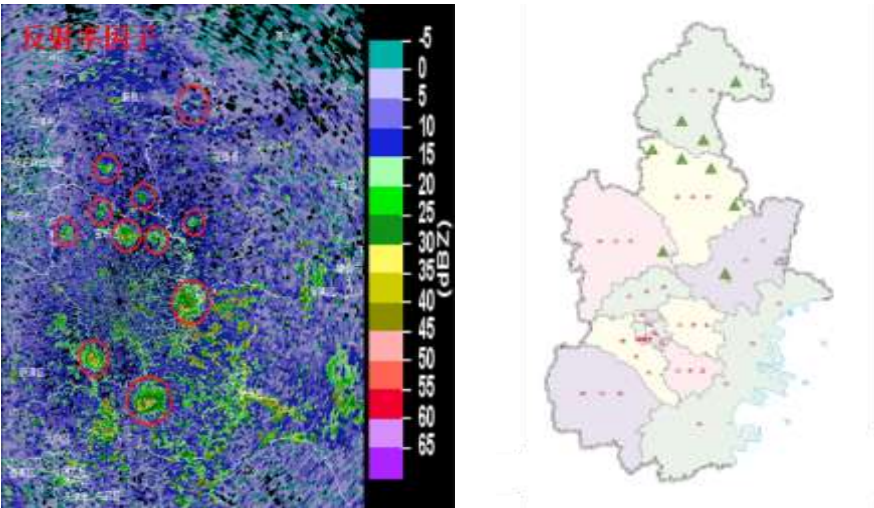


图 13 2022 年 8 月 21 日鸟类活动范围天气雷达 0.5° 仰角反射率产品及相应地图位置

Figure 13 Weather radar 0.5° elevation reflectivity product and corresponding map location for bird activity range on August 21, 2022

4.3 春季鸟类迁徙活动特征

利用宝坻 S 波段双偏振天气雷达 2-3 月的雷达数据，通过分析鸟类回波发现，春季鸟类每天 18: 00 左右开始活动，起飞时间与日落时间有明显的正相关关系（表 3）。由于天气雷达每 6 分钟完成一次体扫数据传输，因此会有 0-6 min 的误差。从鸟类迁徙回波出现到消失，大约持续 1 小时左右。通过统计的几次迁徙过程可以看出，总体活动路线由宁河七里海鸟类保护区、武清大黄堡湿地向宝坻地区移动（图 14）。

表 3 典型春季鸟类远距离迁徙活动过程

Table 3 Typical spring bird long distance migration activity process

日期	起飞时间	降落时间	天气情况
2023 年 2 月 16 日	18: 00	18: 36	多云 1℃/8℃ 东北风 2 级
2023 年 2 月 27 日	18: 18	19: 00	多云/阴 5℃/12℃ 北风 2 级
2023 年 3 月 6 日	18: 30	19: 36	多云/晴 5℃/24℃ 西风 1 级

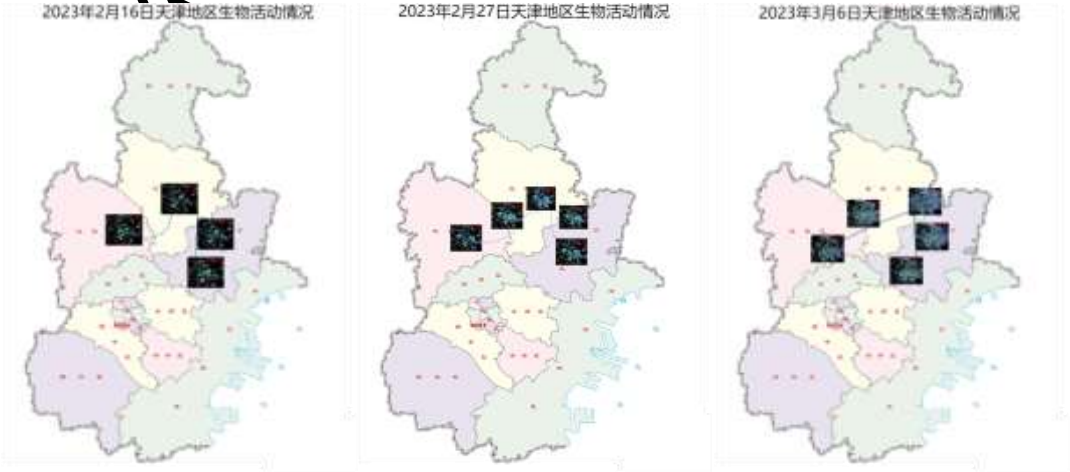


图 14 天津地区春季鸟类迁徙情况
Figure 14 Bird migration in Tianjin in Spring

4.4 鸟类迁徙活动特征对比

夏季鸟类存在局地活动特征，春季和秋季鸟类存在迁徙活动特征，且鸟类离巢时间与日出、日落时间有明显的正相关性，不同季节鸟类活动相关系数均较低，一般小于 0.8。下表为鸟类活动特征对比（表 4）。

表 4 鸟类活动特征对比
Table 4 Comparison of bird activity characteristics

季节	活动特征	活动范围	活动时间	回波特征	径向速度	差分反射率	相关系数
春季	远距离迁徙	>30km	17-19 点	实心不规则	径向速度一致 5-15 m/s	不明显	
夏季	近距离觅食	<30km	4-6 点	C 状或环状	径向速度对称 2-10 m/s	不明显	0.1-0.8
秋季	远距离迁徙	>80km	17-19 点	实心不规则	径向速度一致 10-27 m/s	最大 3~5 dB	

春季鸟类迁徙活动范围一般超过 30 Km，鸟类由南向北在宝坻周边湿地聚集，从回波产品图形上看，聚拢时反射率呈现类圆环或 C 状特征，起飞时呈现实心不规则特征。径向速度趋于一致，鸟类飞行径向速度范围主要分布在 5-15 m/s，部分可达 20-27 m/s。对春季迁徙的鸟类来说，差分反射率特征并不明显。

夏季鸟类局地活动范围一般不超过 30 Km，鸟类离巢活动前期反射率有明显的 C 状或环状特征，中期有明显的空心特征，后期有明显的辐散特征。径向速度有明显的正负对称特征，且径向速度大约在 2-10 m/s，符合鸟类局地觅食活动特征。对夏季局地活动的鸟类来说，差分反射率特征并不明显。

秋季鸟类迁徙活动范围一般大于 80 Km，鸟类离巢活动时反射率呈实心不规则特征，这点与夏季鸟类活动有较大区别。同时，径向速度趋于一致，鸟类径向速度范围大致在 10-27 m/s。秋季迁徙鸟类因横向与纵向体态差异和运动状态的不同，导致差分反射率分布不均匀，最大可到 3~5 dB。

5 结论

利用宝坻 S 波段双偏振天气雷达，对天津地区的鸟类活动特征与规律展开研究，根据夏季鸟类的局地活动特点以及春季、秋季鸟类的迁徙活动特点，得到以下结论：

（1）天津地区春季鸟类迁徙活动发生在 2 月份左右，活动范围一般超过 30 Km，春季鸟类迁徙聚拢时反射率呈现类圆环或 C 状特征，起飞时呈现实心不规则特征，春季鸟类迁徙时径向速度范围主要分布在 5-15 m/s，部分可达 20-27 m/s。

（2）天津地区夏季湿地鸟类局地活动较为明显，活动范围一般不超过 30 Km，夏季鸟

类离巢活动前期反射率有明显的 C 状或环状特征, 中期有明显的空心特征, 后期有明显的
辐散特征, 夏季鸟类局地活动时径向速度大约在 2-10 m/s。

(3) 天津地区秋季鸟类迁徙活动发生在 11 月份左右, 活动范围一般大于 80 Km, 秋季
鸟类离巢活动时反射率呈实心不规则特征, 这点与夏季鸟类活动有较大区别, 秋季鸟类迁徙
时径向速度范围大致在 10-27 m/s, 秋季差分反射率最大可到 3~5 dB, 由此推断秋季迁飞鸟
类翼展较长、个体较大。

(4) 利用宝坻双偏振天气雷达对天津地区鸟类活动展开研究, 在识别空中生物回波时,
相比于单偏振雷达, 双偏振天气雷达产品在识别参数上特征更加明显。利用双偏振雷达捕获
生物回波, 继续深入研究空中生物活动规律, 助力空中生态监测, 为后续航空安全以及生态
保护等提供参考。

参考文献

- 柴子文, 雷维蟠, 莫训强, 等, 2020. 天津市北大港湿地自然保护区的鸟类多样性[J]. 湿地科学, 18(6): 667-678. Chai Z W, Lei W P, Mo X Q, et al, 2020. Bird diversity of Beidagang wetland nature reserve in Tianjin City[J]. Wetland Sci, 18(6): 667-678 (in Chinese).
- 陈唯实, 刘佳, 王青斌, 等, 2023. 气象雷达探鸟技术综述[J]. 航空学报, 44(5): 21-39. Chen W S, Liu J, Wang Q B, et al, 2023. Review on technology of bird detection with weather radar[J]. Acta Aeronaut Astronaut Sin, 44(5): 21-39 (in Chinese).
- 樊淑娟, 2020. 基于卫星追踪研究东方白鹳(*Ciconia boyciana*)的迁徙生态学[D]. 合肥: 中国科学技术大学. Fan S J, 2020. Telemetry study on migration ecology of oriental stoork (*Ciconia boyciana*)[D]. Hefei: University of Science and Technology of China (in Chinese).
- 韩颂雨, 刘永生, 骆阳, 等, 2022. 活用 S 波段多普勒天气雷达的径向速度自动退模糊方法[J]. 气象学报, 80(5): 791-805. Han S Y, Liu Y S, Luo Y, et al, 2022. Automatic radial velocity dealiasing algorithm for S-band Doppler weather radar[J]. Acta Meteor Sin, 80(5): 791-805 (in Chinese).
- 贾金明, 张相梅, 郭明荣, 等, 2007. 豫北多时效归一化棉铃虫气象预报模式[J]. 气象, 33(7): 105-111. Jia J M, Zhang X M, Guo M R, et al, 2007. Development and application of multi-effectiveness normalized prediction model for bollworm in Northern Henan Province[J]. Meteor Mon, 33(7): 105-111 (in Chinese).
- 李丰, 刘黎平, 王红艳, 等, 2012. S 波段多普勒天气雷达非降水气象回波识别[J]. 应用气象学报, 23(2): 147-158. Li F, Liu L P, Wang H Y, et al, 2012. Identification of non-precipitation meteorological echoes with Doppler weather radar[J]. J. Appl Meteor Sci, 23(2): 147-158 (in Chinese).
- 李林, 孙赫敏, 仰美霖, 等, 2022. 基于速度和数量阈值的雨滴谱质量控制方法[J]. 气象, 48(7): 891-898. Li L, Sun H M, Yang M L, et al, 2022. Disdrometer's data quality control method based on speed and quantity threshold[J]. Meteor Mon, 48(7): 891-898 (in Chinese).
- 刘娟, 2015. CINRAD/SC 新一代天气雷达回波地物检测与校正方法探讨[J]. 气象, 41(10): 1286-1291. Liu J, 2015. Detection and

289 d correction discussion of ground echoes of CINRAD/SC new generation Doppler weather radar[J]. Meteor Mon, 41(10): 1286-
 290 1291 (in Chinese).

291 莫训强, 戚露露, 贺梦璇, 等, 2021. 天津市 4 个湿地保护区的鸟类物种多样性[J]. 天津师范大学学报(自然科学版), 41(5): 24-37.
 292 Mo X Q, Qi L L, He M X, et al, 2021. Bird species diversity of four wetland reserves in Tianjin[J]. J Tianjin Normal Univ
 293 (Nat Sci Ed), 41(5): 24-37 (in Chinese).

294 潘佳文, 徐鸣一, 吴举秀, 等, 2023. 基于对流风暴结构的双偏振雷达 Z_{DR} 柱识别及应用研究[J]. 气象学报, 81(6): 943-957. Pan
 295 J W, Xu M Y, Wu J X, et al, 2023. Identification of the Z_{DR} column in dual polarization radar observations based on convect
 296 ive storm structure and related applications[J]. Acta Meteor Sin, 81(6): 943-957 (in Chinese).

297 孙嘉徽, 2020. 天津七里海湿地优先保护鸟种选择及其栖息地恢复研究[D]. 天津: 天津大学. Sun J H, 2020. Research on priority
 298 protection bird species selection and habitat restoration in Tianjin Qilihai Wetland[D]. Tianjin: Tianjin University (in Chinese).

299 王松, 2021. 鄱阳湖白额雁迁飞规律与家域范围研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学. Wang S, 2021. The research on flyway and
 300 home range of greater white-fronted Geese in Poyang Lake[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology
 301 (in Chinese).

302 席宝珠, 俞小鼎, 孙力, 等, 2015. 我国阵风锋类型与产生机制分析及其主观识别方法[J]. 气象, 41(2): 133-142. Xi B Z, Yu X
 303 D, Sun L, et al, 2015. Generating mechanism and type of gust front and its subjective identification methods[J]. Meteor Mon,
 304 41(2): 133-142 (in Chinese).

305 肖欢, 杨悦, 王子东, 等, 2021. 天津大黄堡湿地自然保护区水鸟群落多样性及其生境变化分析[J]. 湿地科学, 19(2): 208-217. Xiao
 306 H, Yang Y, Wang Z D, et al, 2021. Waterbird community diversity and habitat change of Dahuangpu Wetland Nature Reserve, Tianjin[J].
 307 Wetland Sci, 19(2): 208-217 (in Chinese).

308 姚文, 张晶, 余清波, 等, 2022. 辽河三角洲湿地鸟类活动的双偏振天气雷达回波特征[J]. 气象, 48(9): 1162-1170. Yao W, Zhan
 309 g J, Yu Q B, et al, 2022. Dual-polarization weather radar echo characteristics of avian activities in the Liaohe river delta wetl
 310 and[J]. Meteor Mon, 48(9): 1162-1170 (in Chinese).

311 尤平, 李后魂, 王淑霞, 等, 2003. 团泊洼鸟类自然保护区域类及其多样性的研究[J]. 南开大学学报(自然科学版), 36(4): 93-99.
 312 You P, Li H H, Wang S X, et al, 2003. A study on the moth community and its diversity in Tuanbowa birds nature reserve[J]. Acta Sci Nat
 313 Univ Nankaiensis, 36(4): 93-99 (in Chinese).

314 于函, 张鸿波, 刘冬霞, 等, 2022. 飚线系统中的闪电活动与雷达回波特征的相关性研究[J]. 大气科学, 46(4): 835-844. Yu H, Z
 315 hang H B, Liu D X, et al, 2022. Relationship between lightning activities and radar echoes of squall line convective systems
 316 [J]. Chin J Atmos Sci, 46(4): 835-844 (in Chinese).

317 俞小鼎, 姚秀萍, 熊廷南, 等, 2006. 多普勒天气雷达原理与业务应用[M]. 北京: 气象出版社: 51-52. Yu X D, Yao X P, Xiong
 318 T N, et al, 2006. Principle and Application of Doppler Weather Radar[M]. Beijing: China Meteorological Press: 51-52 (in Ch

inese). (查阅网上资料, 未找到本条文献的英文信息, 请确认)

张林, 杨洪平, 邓鑫, 等, 2014. 基于模板匹配法的长乐雷达强超折射回波识别[J]. 气象, 40(3): 364-372. Zhang L, Yang H P, Deng X, et al, 2014. One method based on template matching to remove strong anomalous propagation echo at Changle site [J]. Meteor Mon, 40(3): 364-372 (in Chinese).

张林, 杨洪平, 2018. S 波段 WSR-88D 双偏振雷达观测非降水回波识别方法研究[J]. 气象, 44(5): 665-675. Zhang L, Yang H P, 2018. Non-precipitation identification technique on S-Band WSR-88D polarization weather radar[J]. Meteor Mon, 44(5): 665-675 (in Chinese).

张林, 李峰, 冯婉悦, 等, 2021. 移动 X 波段双线偏振雷达数据质量分析及偏差订正[J]. 气象, 47(3): 337-347. Zhang L, Li F, Feng W Y, et al, 2021. Research of data quality analysis and bias correction on mobile X-band dual-polarization weather radar[J]. Meteor Mon, 47(3): 337-347 (in Chinese).

张宇硕, 卢宪旺, 关洪武, 等, 2021. 天津盘山风景名胜区哺乳动物和鸟类多样性[J]. 野生动物学报, 42(3): 774-782. Zhang Y S, Lu X W, Guan H W, et al, 2021. Diversity of mammals and birds of Panshan Scenic Spot, Tianjin City, China[J]. Chin J Wildlife, 42(3): 774-782 (in Chinese).

张哲, 戚友存, 兰红平, 等, 2023. 深圳 S 波段双偏振和 X 波段双偏振相控阵雷达定量降水估测组网拼图系统介绍[J]. 气象学报, 81(3): 506-519. Zhang Z, Qi Y C, Lan H P, et al, 2023. Introduction to a radar mosaicking system for quantitative precipitation estimation based on the S-band and X-band phased array polarimetric radars in Shenzhen[J]. Acta Meteor Sin, 81(3): 506-519 (in Chinese).

钟谢非, 陈海亮, 劳汉琼, 2023. 湛江 2019 年 4 次冰雹双偏振雷达产品应用分析[J]. 广东气象, 45(3): 54-57, 61. Zhong X F, Chen H L, Lao H Q, 2023. Analysis of the application of dual-polarization radar products in four 2019 hails in Zhanjiang[J]. Guangdong Meteor, 45(3): 54-57, 61 (in Chinese).

朱铁明, 马舒庆, 杨玲, 等, 2022. 上海南汇 WSR-88D 双偏振天气雷达的生物回波识别与分析[J]. 气象与环境科学, 42(3): 118-128. Zhu Y M, Ma S Q, Yang L, et al, 2022. Recognition and analysis of biological echo using WSR-88D dual-polarization weather radar in Nanhui of Shanghai[J]. Meteor Environ Sci, 42(3): 118-128 (in Chinese).

滕玉鹏, 陈洪滨, 马舒庆, 等, 2020. 天气雷达监测生物跨海迁飞方法[J]. 气象, 46(7): 938-947. Teng Y P, Chen H B, Ma S Q, et al, 2020. Weather radar identification of directional biological migrations across the sea[J]. Meteor Mon, 46(7): 938-947 (in Chinese).

Anjita N A, Indu J, 2023. Leveraging weather radars for desert locust monitoring[J]. Remote Sensing Appl Soc Environ, 31: 100983.

Gauthreaux Jr S A, Belser C G, 1998. Displays of bird movements on the WSR-88D: patterns and quantification[J]. Wea Forecast, 13(2): 453-464.

349 Hubbert J C, Wilson J W, Weckwerth T M, et al, 2018. S-Pol's Polarimetric data reveal detailed storm features (and Insect B
350 ehavior)[J]. Bull Am Meteor Soc, 99(10): 2045-2060.

351 Lukach M, Dally T, Evans W, et al, 2022. The development of an unsupervised hierarchical clustering analysis of dual-polariz
352 ation weather surveillance radar observations to assess nocturnal insect abundance and diversity[J]. Remote Sens Ecol Conservi,
353 8(5): 698-716.

354 Stepanian P M, Horton K G, Melnikov V M, et al, 2016. Dual-polarization radar products for biological applications[J]. Ecosp
355 here, 7(11): e01539.

356 Zrnic D S, Ryzhkov A V, 1998. Observations of insects and birds with a polarimetric radar[J]. IEEE Trans Geosci Remote Se
357 ns, 36(2): 661-668.

