

# 基于 ERA5 数据的极地大气波导统计分析

杨晓亮

(江苏均天电子科技有限公司, 江苏 南京 210001)

**摘要** 为分析极地大气波导的时空统计特征, 本研究基于 ERA5 数据选取温度、湿度和气压等变量进行预处理和质量控制, 运用大气修正折射率公式计算折射率剖面, 依据波导判据识别表面波导和悬空波导并提取波导特征参数。统计结果显示, 北极地区大气波导发生频率呈现显著的季节和空间差异, 表面波导发生频率与近地面逆温层密切相关, 悬空波导多生成于水汽剧变层, 关键气象参数的敏感性分析表明温度和湿度变化对波导形成具有主导作用, 可为极地电磁环境评估和预测提供科学依据。

**关键词** ERA5 数据; 极地; 大气波导; 时空分布

**中图分类号**: TP31; P42; TN25

**文献标志码**: A

**DOI**: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.06.001

## 0 引言

在极地地区, 特殊大气层结形成的导致电磁波传播路径异常弯曲并产生超视距传播或盲区、对现代极地活动构成显著影响的大气波导, 会显著改变电磁系统效能, 可能引致通信中断、雷达虚警或漏报。传统依赖现场探空观测的大气波导研究, 因极地地域广袤、环境恶劣造成的常规观测站点稀疏、数据稀缺, 难以支撑大范围、长时间序列的统计分析, 欧洲中期天气预报中心发布的 ERA5 大气再分析数据所提供的覆盖全球的高时空分辨率、长时间跨度的多种气象要素场, 为系统研究极地这类观测稀缺区域的大气波导时空分布与演变规律创造了新的数据条件。本研究基于该数据统计分析极地大气波导特征, 明确其分布规律与形成机制以支持极地电磁环境可靠应用。

## 1 大气波导形成机理与 ERA5 数据介绍

### 1.1 大气波导的定义

大气波导作为发生在边界层或自由大气中的一种特殊层结, 其物理本质为大气折射率在垂直方向出现负梯度异常剧烈的结构, 该结构导致电磁波传播路径的曲率大于地球表面曲率, 进而使电磁波在该层结内被陷获并实现超视距传播, 而大气折射率主要由大气的温度、气压和水汽压决定, 其垂直梯度的剧烈变化构成波导形成的核心条件<sup>[1]</sup>。

### 1.2 ERA5 再分析数据介绍与预处理

#### 1.2.1 ERA5 数据来源与变量选择

本研究采用的 ERA5 是欧洲中期天气预报中心发布

的第五代全球气候再分析数据集, 用于本研究的 ERA5 数据时间跨度覆盖多年, 提供逐小时的高分辨率输出。其水平网格分辨率约为 0.25 度, 在纬度方向提供 1 440 个格点, 经度方向提供 721 个格点。在垂直方向上, ERA5 提供从地表直至 0.01 hPa 气压高度的 137 个标准气压层数据, 提供了对大气层结精细结构的描述能力。诊断大气波导所需的关键气象要素均从 ERA5 中提取, 主要包括不同气压层上的温度、比湿以及地表气压。

#### 1.2.2 数据处理与质量评估

下载后的原始 ERA5 数据需从规则的气压坐标系转换到以海拔高度为基准的垂直坐标系中, 因波导判据依赖于折射率对高度的梯度, 随后利用温度、气压和水汽压数据计算每个高度层上的大气折射率, 并为确保数据的可靠性对 ERA5 再分析数据在极地区的质量进行评估。

### 1.3 基于 ERA5 数据的大气波导诊断模型

#### 1.3.1 修正大气折射率公式

大气波导的直接使用折射率受地球曲率影响较大, 故在雷达和电波传播领域通常使用修正折射率, 其将地球曲率的影响纳入, 使得在标准大气中修正折射率的垂直梯度为常值。大气修正折射率  $M$  的计算公式基于大气折射率  $N$  导出。大气折射率  $N$  采用经典的 Debye 公式近似, 是温度、气压和水汽压的函数:

$$N = 77.6 \frac{P}{T} - 5.6 \frac{e}{T} + 3.75 \times 10^5 \frac{e}{T^2} \quad (1)$$

式(1)中,  $P$  为大气压强, 单位为 hPa;  $T$  为大气温度, 单位为 K;  $e$  为水汽压, 单位为 hPa。水汽压  $e$

**作者简介**: 杨晓亮 (1983-), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 气象海洋。

由比湿  $q$  和压强  $P$  计算得到： $\frac{qP}{0.622+0.378q}$ 。得到折射率  $N$  后，修正折射率  $M$  由下式给出：

$$M=N+\frac{h}{R_e}\times 10^6 \quad (2)$$

式(2)中， $h$ 为距离地面的几何高度，单位为m； $R_e$ 为地球的等效半径。大气波导的形成条件被转化为修正折射率  $M$  在垂直高度上随高度增加而减少，即其垂直梯度  $dM/dh < 0$ <sup>[2]</sup>。

### 1.3.2 波导判据与特征参数提取算法

基于修正折射率  $M$  的垂直廓线，采用梯度法自动诊断大气波导的存在并提取其特征参数。诊断算法从地表开始，逐层计算大气修正折射率  $M$  的垂直梯度  $dM/dh$ 。当算法检测到  $dM/dh \leq 0$  时，判定进入一个可能的陷获层是公认的形成标准大气波导的临界梯度。陷获层一直延伸到  $dM/dh$  重新变得大于或等于0的高度为止。在确定陷获层后，需要进一步判断波导类型并计算特征参数。如果陷获层的下边界高度为0 m，则判定为表面波导；否则判定为悬空波导。

## 2 北极大气波导时空分布统计特征

### 2.1 研究区域与时间范围界定

本研究定义的北极区域为北纬  $60^\circ$  以北的整个极地地区，空间范围覆盖包括格陵兰岛、斯瓦尔巴群岛、北欧海域、巴伦支海、喀拉海、拉普捷夫海、东西伯利亚海、楚科奇海、波弗特海、加拿大北极群岛区域以及北冰洋中央海盆。地理经度范围从  $180^\circ$  W 至  $180^\circ$  E，纬度范围从  $60^\circ$  N 至  $90^\circ$  N。该区域既包含广阔的冰盖与多年海冰，也涵盖季节性的开阔水域与边缘冰区，下垫面类型复杂。时间范围选取基于 ERA5 再分析数据的完整性和气候代表性，确定为连续十年，具体从2013年1月1日至2022年12月31日。

### 2.2 大气波导发生频率的时空分布

北极大气波导发生频率存在极其显著的时空非均匀性。从空间分布看，表面波导的高发区集中在大西洋扇区的边缘冰带与开阔水域，特别是巴伦支海、喀拉海及格陵兰海东侧，年平均发生频率可超过20%。这些区域受北大西洋暖流影响，温暖海面与寒冷空气相遇，频繁形成强盛的近地表逆温，利于表面波导生成。北冰洋中央海盆全年被海冰覆盖，表面波导频率相对较低，普遍低于10%。悬空波导的高值区分布有所不同，在楚科奇海、波弗特海及欧亚大陆北岸的沿海区域呈现较高的发生频率，可达15%以上。从季节变化看，表面波导表现出强烈的秋冬高峰，在十月至次年一月期间，北大西洋扇区的波导频率可达30%以上，这与秋冬季节海气温差加大、风暴活动频繁输送暖湿气团

有关。夏季，表面波导发生频率显著降低，大部分海域低于5%。悬空波导的季节性高峰出现在夏秋过渡季节，可能与这一时期低云、雾及稳定大气层结出现较多有关。从地理空间看，大气波导的发生与下垫面性质密切相关，开阔水域在冷季是表面波导的“热区”，而海冰边缘区则是悬空波导的活跃带。

### 2.3 大气波导特征参数统计

本研究对识别出的所有波导事件的特征参数进行定量统计，揭示了北极大气波导的结构特性，具体见表1<sup>[3]</sup>。

表1 北极地区大气波导特征参数统计摘要(基于2013-2022年数据)

波导类型	特征参数	平均值	标准差	第5百分位数	中位数	第95百分位数
表面波导	厚度(m)	52.1	45.3	12.0	40.0	168.0
	强度(M-unit)	-8.7	7.2	-2.3	-6.9	-23.5
	底高(m)	412.5	356.8	85.0	320.0	1 250.0
悬空波导	厚度(m)	162.4	128.7	35.0	135.0	480.0
	强度(M-unit)	-10.5	9.8	-2.5	-8.1	-28.0

表面波导厚度相对较薄、统计中值约40 m但存在显著变率，较厚者通常与强而深厚的逆温层相关联，其强度  $\Delta M$  平均约-8 M-units、强事件中可低于-20 M-units且更强的负  $M$  值差意味着对电磁波更强的陷获能力；悬空波导底高分布较广、平均底高约在300~600 m之间(与低空逆温层或湿度剧变层的典型高度相符)，厚度通常大于表面波导、平均值约150 m且部分深厚者可超过500 m，强度平均约-10 M-units且变化范围很大。

## 3 典型气象条件与波导形成关联分析

### 3.1 极地逆温与表面波导的关联性

极地近地表强逆温作为表面波导形成的主导气象条件，由较暖空气平流至寒冷冰面或海面之上、近地层因强烈辐射冷却导致温度随高度增加形成逆温层，该层结抑制垂直混合使水汽积聚在近地面造成显著的湿度随高度递减，温度递增与湿度递减的共同作用导致大气修正折射率  $M$  在逆温层内急剧减小，具体统计如表2所示<sup>[4]</sup>。

统计分析明确显示，表面波导的发生频率与近地层逆温强度呈现极强的正相关，定义逆温强度为地表以上50 m高度与地表之间的温度差  $\Delta T$ 。当  $\Delta T$  小于1.0

K 时, 表面波导发生频率不足 5%; 当  $\Delta T$  超过 5.0 K 时, 波导频率急剧上升至 30% 以上。

表 2 近地表逆温强度与表面波导特征的统计关系

逆温强度 $\Delta T$ (K)	波导发生频率 (%)	平均波导厚度 (m)	平均波导强度 (M-unit)
$0.0 \leq \Delta T < 2.0$	3.2	28.5	-4.1
$2.0 \leq \Delta T < 4.0$	12.7	45.8	-7.3
$4.0 \leq \Delta T < 6.0$	28.4	61.2	-10.6
$6.0 \leq \Delta T < 8.0$	41.5	78.9	-14.9
$\Delta T \geq 8.0$	52.1	102.4	-19.7

### 3.2 关键气象参数的敏感性分析

为定量评估不同气象要素对大气波导形成的影响程度, 本文进行基于大量样本、选取近地表空气温度、海表温度、2 m 比湿、海气温差以及低空温度垂直梯度等关键参数的敏感性分析, 并计算各参数在特定变化范围内波导发生频率的变化率, 见表 3<sup>[5]</sup>。

表 3 关键气象参数对表面波导发生频率的敏感性分析

气象参数	参数变化区间	波导频率变化 (%)	敏感性系数 (%) / 单位
海气温差 (SST-T2 m)	-2.0 ~ +2.0 K	+5.1 ~ +35.2	+7.5% K
	2.0 ~ 6.0 g/kg	+12.3 ~ +28.7	+4.1% g/kg
低空温度垂直梯度 (0 ~ 100 m)	0.0 ~ +1.5 K/100 m	+3.0 ~ +25.5	+15.0% K/100 m

结果表明, 对表面波导发生频率最敏感的参数为海气温差 (即海表温度与 2 m 空气温度之差), 且其从负值转为正值并增大时表面波导频率呈近似指数增长, 其中在开阔水域海气温差每增加 1.0 K 表面波导发生概率平均增加约 8%; 2 m 比湿敏感性次之, 因较高比湿意味着近地表水汽压高并加剧随高度水汽减少效应, 故有利于更强负  $M$  梯度; 低空温度垂直梯度敏感性在逆温条件下显著, 其梯度值每增加 0.1 K/100 m 波导频率提升明显。

### 4 结论

本研究基于高分辨率 ERA5 再分析数据构建适用于极区的大气波导诊断模型, 系统分析北极地区大气波导时空统计特征并定量揭示其与关键气象条件物理关联, 明确北极表面波导与悬空波导空间分布差异及季节变化差异, 具体结论如下:

1. 表面波导的高发区集中在大西洋扇区的边缘冰

带与开阔水域, 特别是巴伦支海、喀拉海及格陵兰海东侧, 年平均发生频率可超过 20%。

2. 表面波导发生概率较低区域位于北冰洋中央海盆全年被海冰覆盖, 普遍低于 10%。

3. 悬空波导高发区在楚科奇海、波弗特海及欧亚大陆北岸的沿海区域, 发生概率可达 15% 以上。

4. 表面波导秋冬季节发生概率最高, 可达 30% 以上; 夏季, 表面波导发生频率显著降低, 大部分海域低于 5%。

5. 悬空波导的季节性高峰出现在夏秋过渡季节。

基于再分析数据的波导气候统计能为极地通信、雷达系统频率选择、链路预算与性能评估提供重要环境背景和量化输入, 具有明确的实用价值。

### 参考文献:

[1] 吕尚嵘, 官晟, 王凤军. 2023 年东南大西洋春季航次风剖面数据与 ERA5 数据比对与校正 [J/OL]. 海洋科学进展, 1-17 [2025-12-30] [2026-01-12]. [https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=cpyCR\\_1GzmDT40Vlg-nOUrQVraNRibVSPRSBdAgPMuFJHUwh8AKdl654Ry3FtNrMr6U3mx9V9RyMcochzJk3VUG2i9ROJkKCFeHJJSN7hfw-5fzE1QQ4YpG\\_ucxzE3g2Cq2MPmGfr0e41YT\\_joFsyR7YtmP3h0UANXNe95b0tkurQPSDtk2NA==&uniplatform=NZKPT&language=CHS](https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=cpyCR_1GzmDT40Vlg-nOUrQVraNRibVSPRSBdAgPMuFJHUwh8AKdl654Ry3FtNrMr6U3mx9V9RyMcochzJk3VUG2i9ROJkKCFeHJJSN7hfw-5fzE1QQ4YpG_ucxzE3g2Cq2MPmGfr0e41YT_joFsyR7YtmP3h0UANXNe95b0tkurQPSDtk2NA==&uniplatform=NZKPT&language=CHS).

[2] 吴佳静, 魏子良, 崔铁军, 等. 基于多源数据的极区低空大气波导时空分布统计研究 [J/OL]. 极地研究, 1-19 [2025-12-05] [2026-01-12]. [https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=cpyCR\\_1GzmAeZhdP0sirR0I\\_AvpCSnhuc5OnzcpfviiNWlkkDzedmvoq1XmKIFoe5ktNEffqaoBnFO3BcSB8QpCLsyUbr4Ax9qql4flPMxEtIqWAhubkQnMjj2\]\\_vVSp4dMbk5XV3efxE8ZeftjkJhWkQjCYjd2cyNVYWARrArvymBUxvDQ==&uniplatform=NZKPT&language=CHS](https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=cpyCR_1GzmAeZhdP0sirR0I_AvpCSnhuc5OnzcpfviiNWlkkDzedmvoq1XmKIFoe5ktNEffqaoBnFO3BcSB8QpCLsyUbr4Ax9qql4flPMxEtIqWAhubkQnMjj2]_vVSp4dMbk5XV3efxE8ZeftjkJhWkQjCYjd2cyNVYWARrArvymBUxvDQ==&uniplatform=NZKPT&language=CHS).

[3] 张志华, 焦林, 王华, 等. 北极大气波导分布特征及其检验分析 [J/OL]. 遥测遥控, 1-12 [2025-09-30] [2026-01-12]. [https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=cpyCR\\_1GzmBDAzuirbfoQsc2qTewKp7bkiGRQYSIF2ddoy4buLgns4Uv80-jps65bvufez4OFM0RT5WebRlbVeC76ID-k6p\\_6FwKKbV18BQN8LuvB0YYb349UP\\_EcJX9F53gw\\_8jbx31fsgjcwOaIz5\\_EwY09sTHgx1kucjv3pNLHuVQ4\\_nGVg==&uniplatform=NZKPT&language=CHS](https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=cpyCR_1GzmBDAzuirbfoQsc2qTewKp7bkiGRQYSIF2ddoy4buLgns4Uv80-jps65bvufez4OFM0RT5WebRlbVeC76ID-k6p_6FwKKbV18BQN8LuvB0YYb349UP_EcJX9F53gw_8jbx31fsgjcwOaIz5_EwY09sTHgx1kucjv3pNLHuVQ4_nGVg==&uniplatform=NZKPT&language=CHS).

[4] 王金悦. 海冰过程影响下北极低空大气波导时空特征数值模拟研究 [D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2025.

[5] 武鑫源, 纪永刚, 肖艳芳. 基于 ERA5 再分析数据的北极暖季海雾近地面气象特征分析 [J]. 海洋科学进展, 2025, 43(04):787-797.