以下为作者制作的版本，该文章已于2023年1月27日获准在《环境遥感》期刊发表（©2023年，依据 CC-BY-NC-ND 4.0 许可）。初次投稿日期为2022年3月14日。出版商发布的正式版本可引用为Danielson, R. E., H. Shen, J. Tao, and W. Perrie, 2023: 海洋表面丝状结构对风速的依赖关系：北大西洋露脊鲸栖息地的观察性研究。所有版本均致力于探讨：

圣劳伦斯湾鲸目击记录与合成孔径雷达图像的配准 次中尺度丝状结构与海洋表面风速依赖关系的量化 皮尔逊相关与距离相关的线性分量和非线性分量的一致性 对合成孔径雷达对比度进行简单的风速校正

arXiv:2302.01533v2 [stat.AP] 8 Feb 2023

海洋表面丝状结构对风速的依赖关系：北大西洋露脊鲸栖息地的观察性研究

Richard E. Danielson、Hui Shen、Jing Tao 和 William Perrie 加拿大渔业与海洋部贝德福德海洋研究所 加拿大新斯科舍省达特茅斯

关键词：海流变形、合成孔径雷达、海面丝状结构

摘要

海洋表面的相干丝状结构通常呈现为短暂的水团边界，其间海流汇聚、表面活性剂聚集，而深处的锋面结构可能勾勒出上层水柱中增强的生物活动。星载合成孔径雷达（SAR）可在 O[1-km] 分辨率下观测丝状结构，但在较弱风况下，更容易显现大范围的相干结构。本文针对长度至少为 10 km 的丝状结构（即连续的 SAR 对比）提出一种风速校正方法。研究考察了依赖关系的度量指标（距离相关，以及皮尔逊相关的线性和非线性分量），以识别丝状体对比度与较弱或中等表面风速之间关系中的宽峰值；其中，通过采用可变风速指数来使这些指标达到最大。

通过324幅 Radarsat-2 合成孔径雷达图像以及 ERA5再分析提供的10米风速，对圣劳伦斯湾内北大西洋露脊鲸（北大西洋露脊鲸）近期目击记录的三个地点进行了2008年至2020年的采样。研究量化了合成孔径雷达对比度幅度与风速之间的反向关系，并发现当合成孔径雷达对比度按风速的0.8次方加权时，三个区域的相关性均有所降低。因此，在搜寻北大西洋露脊鲸的猎物聚集群时，可以考虑更加均匀地关注单个合成孔径雷达场景或多个场景中的海洋表面结构。

1 引言

圣劳伦斯湾（GSL）的生态系统研究非常适合用于评估浮游动物的种群和供应量哲水蚤属，即濒危北大西洋露脊鲸（NARW）的首选猎物，北大西洋露脊鲸（Plourde 等，2019；Sorochan 等，2019；Gavrilchuk 等，2020；Brennan 等，2021）。然而，对于一种米粒大小的动物而言，其局部聚集（即只有密集的哲水蚤属聚集才能为一头北大西洋露脊鲸带来净能量盈余）的是北大西洋露脊鲸本身（Baumgartner 等，2007）。对露脊鲸的观测结果表明，母鲸会为幼鲸提供觅食路径，觅食时也会运用感官知觉。此外，Kenney 等（2001年）提出了若干假说，说明露脊鲸如何在其当前活动范围之外发现哲水蚤属聚集。

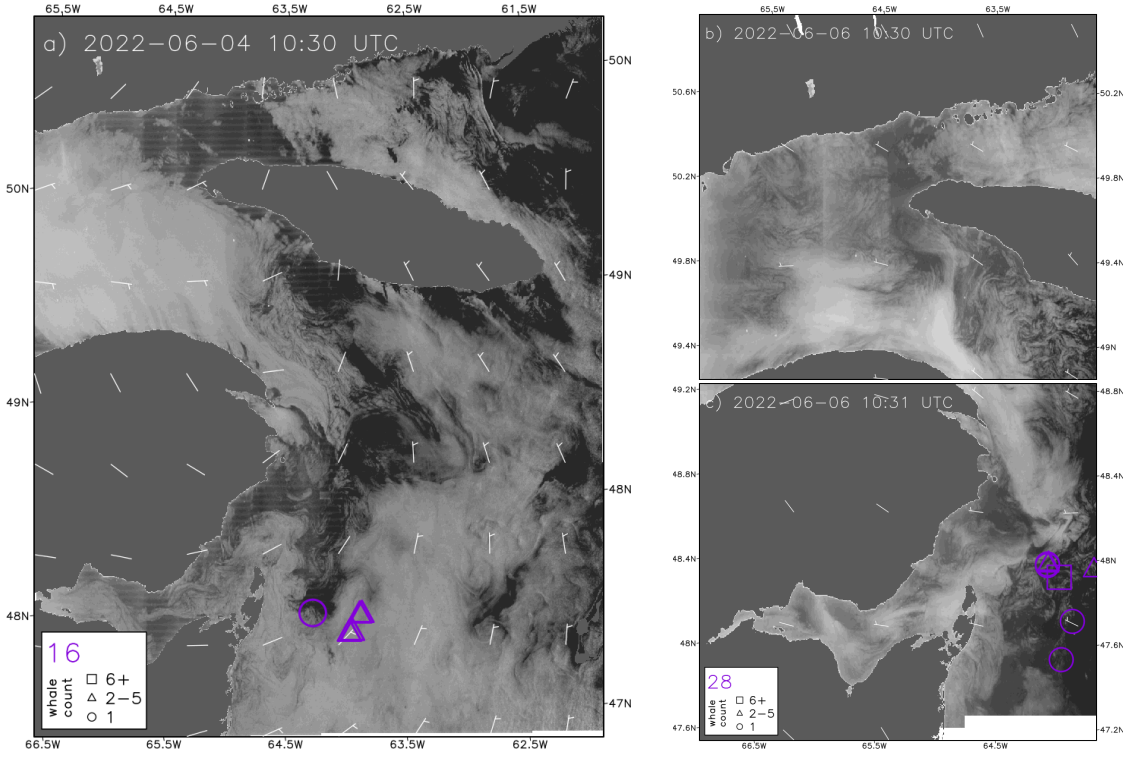

图1：在圣劳伦斯湾弱风平静期，分别由 a) Radarsat Constellation Mission（RCM-1）和 b、c) 哨兵（S-1a）卫星的降轨观测获取的合成孔径雷达图像。图中显示的是 2022年6月4日（左）和6月6日（右）10:30 协调世界时的归一化雷达后向散射截面（σ_o）。深色和浅色分别表示较小和较大的 σ_o。（或较光滑和较粗糙的海洋表面）。紫色标记表示相应日期北大西洋露脊鲸群的目击位置，左下角标注了个体总数。风羽数据根据 ERA5再分析进行插值，半风羽表示 5 ms^{-1}。

关于哲水蚤属各物种生活史以及圣劳伦斯湾预期生物量分布的综述见Sorochan 等人(2021，他们强调有必要探索深水处的北大西洋露脊鲸猎物聚集，以及潮汐混合和淡水脉冲所界定区域内的表层暂时性聚集，还有上层混合层中的辐合环流（其图 5a）。与互补的高分辨率卫星图像（例如Basedow 等，2019；Barthelmeß 等，2021）中的聚集线索一样，互合成孔径雷达（SAR）图像中海面粗糙度图样的解读已相当成熟（Holt，2004）。Munk 等人(2000) 对相关历史作了梳理，并探讨了 O[10-km]气旋涡旋的动力学，其中可以观察到海洋表面的相干丝状结构不断演变。这些进展引出了一个问题：SAR 粗糙度图样所揭示的洋流、锋面、波浪和涡旋，是否有助于理解北大西洋露脊鲸猎物的聚集。

图 1 展示了圣劳伦斯湾在两天弱风期间前后的粗糙度图样。深色和浅色阴影分别表示平滑和粗糙的海洋表面。在最小尺度上，各种深浅的丝状结构随处可见，丝状结构之间的横向间距为 O[10 km] 或更小。McWilliams 等人(2009) 表明，由初始的锋生（例如涡旋）环流组织起来的对称边界层演变，可能导致快速下沉流。在 SAR 图像中，这表现为较深色的线条，其宽度小于相邻的浅色线条（例如，64.5°W 以东）。陆地或大气来源的表面活性剂（活性表面物质）积聚也会增强这种对比；其在水柱中的来源包括细菌、浮游生物、鱼类和原油渗漏（Espedal 等（1998）；Hamilton 等人 2015年；Kurata 等人 2016）。

图中还可明显看出表面应力的大尺度分布模式。1暗区缺少会产生雷达后向散射的[1-10- 厘米] 粗糙度要素，表明风速低于约 2 米/秒$^{-1}$（Holt，2004）。然而，这一平滑区域的南部边界似乎也界定了一个向圣劳伦斯湾南部延伸的前兆水团，靠近观测到 16 头北大西洋露脊鲸的位置（图1a）。再往上游，沿加斯佩´半岛北岸的明亮区域（参见图2）表明存在一个相对温暖且清新的表层，并伴有增强的大气耦合（例如，图1a 中向北的线条很可能是离岸风条纹）。几天之内（图 1b），这一大尺度粗糙度对比便向北延伸至更北方的北大西洋露脊鲸群。沿着前兆水团和后续水团的边界，似乎存在表面流汇聚现象；不过，正如预期的那样（Espedal 等（1998）；Munk 等（2000）），界定明亮区域的对比不如界定图 1暗区的对比稳定。表面活性剂可能发挥的作用将在第5节中进一步讨论。

1.1 雷达建模

这段弱风平静期是合成孔径雷达快照所捕捉到的上层海洋流响应的典型例证。 Rascle 等人（2017，2020年）进一步强调，洋流会调制波浪和波浪破碎，进而在广泛的环境条件下调制表面粗糙度，包括风速高达约 10 ms 时。$^{-1}$其理论基础由适于处理对观测和环境条件依赖性的雷达模型提供。 Kudryavtsev 等人（2012a，b）提出了一个统一的粗糙度对比度框架，对于合成孔径雷达归一化雷达后向散射截面的测量而言（$\sigma_\circ$），其定义为

$$\frac{\sigma_\circ - \overline{\sigma_\circ}}{\overline{\sigma_\circ}}. \tag{1}$$

上划线表示平滑至较低分辨率。粗糙度对比不仅是突出各种强度丝状体的有效方法（参见Young 等人（2008）），相应的雷达成像模型（RIM；Kudryavtsev 等人（2005））还提供了一个函数表达式，该表达式随海流辐合线性变化；在弱风条件下，则非线性地取决于表面活性剂（例如其厚度或弹性）。对比度也非线性地取决于风速，其变化几乎与摩擦速度平方的倒数成正比（Kudryavtsev 等人（2012b））。

RIM模型的函数形式表明，风应力和表层海流辐合可在一定程度上独立于它们先前的耦合演变来考虑。换言之，像图1 这样的合成孔径雷达快照，或许能捕捉到相似的海流对比度瞬态模式，无论风力较强还是较弱，只是对比度本身分别较弱或较强。因此，可以考虑进行调整，使单个合成孔径雷达场景内的丝状体对比度更加均匀，并尽可能适用于更多场景，例如圣劳伦斯湾的场景。这种均匀性有助于更精确地搜寻瞬态哲水蚤属聚集（Kenney 等人（2001）；Sorochan 等人（2021））。随后，可优先将调整后的合成孔径雷达对比解释为海流辐合；或者更准确地说，将其解释为辐合与应变共同作用造成的海流形变（Rascle 等人（2014））。

1.2 测量建模

我们将测量建模作为雷达或生态系统建模等面向过程的方法的补充加以介绍。它非常适合评估合成孔径雷达对比度调整对风速的影响，尽管预计其与海况（及其他变量）之间存在复杂的依赖关系。一方面，构建测量模型并不需要明确感兴趣的过程，但我们的评估可视为针对圣劳伦斯湾测量结果的选择。另一方面，过程模型（例如，Kudryavtsev 等人（2012b））旨在描述一种普遍关系，这种关系通常适用于广泛的测量结果；但另一方面，按其构建方式，必须明确复杂的过程。从形式上说，我们的研究也称为观察性研究（Cochran（1972）），采用相关性度量来识别（Palacios 等人（2013）；Edelmann 等人（2021））并调整测量依赖性。

借助简单的测量模型，我们拟考察一种局部且因此为非线性的关系，重点关注北大西洋露脊鲸的觅食栖息地，以及被识别为连续合成孔径雷达对比度的丝状结构（参见Young 等人（2008））。遵循Sz´ekely 和 Rizzo (2009)以及Danielson 等人(2020)，研究尝试量化合成孔径雷达对比度与风速的线性分量和非线性分量风速关系。第3节介绍丝状结构的识别方法和依赖性度量。第4节考察连续对比与风速之间的关系，并进行调整。第5节讨论生物物理和统计方面的问题，第6节给出结论。

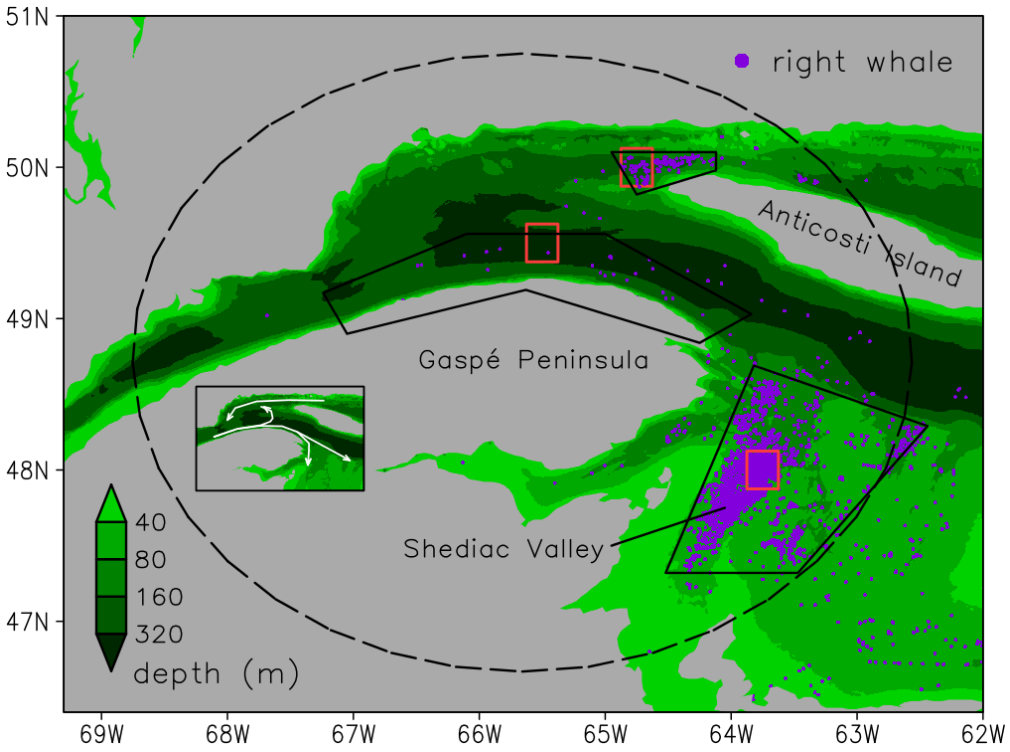

图2：2015年至2020年间北大西洋露脊鲸（北大西洋露脊鲸；紫色圆点）的4900次目击记录位置，以及圣劳伦斯湾西部的水深地形（绿色阴影）。黑色实线圈出安蒂科斯蒂（北部）、加斯佩（西部）和谢迪亚克（南部）区域（见正文）。红线圈出相应的ERA5 10米风速网格框。插图中的白色箭头显示圣劳伦斯湾西部的环流模式。请注意，目击记录取决于搜索努力，时空覆盖并不均匀。

2 数据

本节介绍了2015- 2020年圣劳伦斯湾（GSL）三个子区域的露脊鲸目击记录，以及2008-2020年的SAR和风数据。2010年代期间猎物可获得性的显著变化（Sorochan 等，2019）使现存的北大西洋露脊鲸种群离开了其在缅因湾和斯科舍陆架的传统觅食栖息地，转而前往圣劳伦斯湾较浅的区域；在2013年之前，它们仅偶尔在那里被发现（Ken-ney2019）。自2015年以来，北大西洋露脊鲸在5月至11月期间均有目击记录，且更频繁地出现在沿圣劳伦斯湾西南部的谢迪亚克谷，以及安蒂科斯蒂岛西北方的一小片区域（图2）。作为海湾大范围气旋式环流的一部分（Koutitonsky和Bugden, 1991年；Lavoie等，2016年），安蒂科斯蒂岛附近的目击记录位于最上游（图2中的北部区域），水流通常沿北岸向西流动，直至与加斯佩´海流汇合（狭长的西部区域）。相对低盐的圣劳伦斯河口流出水也汇入这股沿岸流，沿途绕过加斯佩´半岛。已知加斯佩´海流会输送哲水蚤属，并周期性地侵入谢迪亚克谷（南部区域；Brennan

等，2021年）。2019年暖季的显著特点是圣劳伦斯河径流量较高，且合成孔径雷达覆盖良好。

2.1 鲸目击记录

圣劳伦斯湾猎物聚集的典型位置取自两个鲸目击记录来源。北大西洋露脊鲸联盟（NARWC）目击记录数据库（Kenney，2019年；NARWC（2021））收录了自2015年起在圣劳伦斯湾通过航空调查和机会船只获得的3265条露脊鲸目击记录（目击对象为鲸群或单头鲸）。加拿大渔业与海洋部（DFO）的另一数据库收录了2586条露脊鲸目击记录（DFO（2020）），但未包含最近几年部分航空调查的数据。一些DFO目击记录可能是死鲸，但只有NARWC数据记录了这一点（因此NARWC数据从3265条减少至3188条）。DFO目击记录以当地时间和协调世界时报告（NARWC的目击记录采用协调世界时）。

NARWC 和 DFO 数据集各自包含一些完全相同的目击记录，这些记录的时间间隔仅几分钟、距离不足 1 千米[1]。这表明同一名观察员或多名观察员可能会对同一头鲸重复报告不止一次（并且有些鲸被记录的次数多于其他鲸，无论是在同一天还是不同日期）。这种观察工作量重复被保留。与工作量无关的是，NARWC 和 DFO 的目击记录也存在部分重叠，因此，如果在 24 小时内和 0.01° 纬度和经度范围内出现两条关于相同数量鲸的目击记录，则会删除重复记录。这使合并后的目击记录数量减少了 874 条。剩余的 4900 条关于一群或一头北大西洋露脊鲸的目击记录（1712 条和 3188 条；见图2）对应于 7591 条个体目击记录。各年份的数量列于表1中，但需注意，2019 年和 2020年 的目击记录仍为初步数据。

年份	北大西洋露脊鲸目击次数	合成孔径雷达场景	包含北大西洋露脊鲸的场景		场景中的目击次数	
2015	114/343	86	2	(2%)	2/3	(2%/1%)
2016	100/159	53	3	(6%)	6/9	(6%/6%)
2017	1151/2118	83	11	(13%)	165/278	(14%/13%)
2018	1622/2913	105	4	(4%)	31/33	(2%/1%)
2019	1904/2049	188	31	(16%)	669/705	(35%/34%)
2020	9/9	68	0	(0%)	0/0	(0%/0%)

表1：2015年至2020年圣劳伦斯湾北大西洋露脊鲸目击记录（按群体/个体计）及每年的合成孔径雷达场景数量（2019年和2020年的目击记录为初步数据）。列出了包含露脊鲸的场景数量，以及与这些场景时空重合的露脊鲸目击记录数量（按群体/个体计），括号内为其总数所占比例。如果目击记录与合成孔径雷达场景发生在同一天，则认为两者在时间上重合。合成孔径雷达的覆盖范围（图 2 中虚线圆圈所示）为5月至十二月；2015年以前还包括11个（2008年）、24个（2009）、31个（2010年）、99个（2011年）、63个（2012年）、68个（2013年）和62个（2014）场景。

2.2 合成孔径雷达（SAR）

Radarsat-2 C波段（5.3厘米）合成孔径雷达自2008年5月起在距地表约800千米的地球极轨道上运行。它能够以入射角在 20°（近距）至 49°（远距）之间的水平和垂直（H和V）极化进行发射和接收。在圣劳伦斯湾，可获得像素分辨率为100米或更小、幅宽超过300千米的覆盖数据。我们考虑了2008年至2020年5月至12月无冰月份期间的所有数据获取，这些数据与图2中的虚线圆相重叠。最终得到941个合成孔径雷达场景，采用相同的发射和接收极化方式，（即HH或VV），其中除三个场景外，其他场景均采用窄幅或宽幅ScanSAR波束模式。尽管圣劳伦斯湾的合成孔径雷达覆盖范围因年份而略有不同（表1），但2017年和2019年的观测覆盖情况尤为显著，其中2019年的观测数量最多（1904次）、圣劳伦斯湾覆盖最佳（188个场景），且观测覆盖率最高（35%）。

我们重点研究覆盖安蒂科斯蒂、加斯佩和谢迪亚克区域的部分场景（图2），时间范围为五月中旬至八月中旬（即鲸鱼觅食期间，此时风力较弱，丝状结构更容易识别）。这些场景分别有177、241和

[1]关于北大西洋露脊鲸出现与缺失的信息通常较为稀少，但机会性目击在靠近海岸和夏季月份更为频繁。目击 *effort* 还取决于观测条件（例如，能见度取决于海况、雾、降水和一天中的时间）。2016年后观测力度有所增加，但受到COVID-19的影响；本文未进行观测力度校正。

237个场景（共324个场景）。合成孔径雷达（$\sigma_\circ$）的初始处理包括使用平滑算子降低归一化雷达后向散射截面（Koch（2004））的分辨率，每次处理均将分辨率减半。这会生成分辨率为100米、200米、400米、800米、1600米、3200米、6400米和12800米的场景（例如，图3a、g、l）。在800米分辨率下，我们还使用CMOD5 VV 海洋风模型对每个场景进行初步掩膜处理（Hersbach等人，2007年），与Zhang 等人(2011）中 HH 场景的入射角偏振比。这一处理旨在部分去除与丝状结构无关的特征，同时保留感兴趣图案周围的边界，例如图1所示场景中的图案。下一节（图3 和4）将对此进行说明。这种初步掩膜假设 $\sigma_\circ$对应于风速为 1 m/s、风向平行于卫星轨迹的情况$^{-1}$ ，以及风速为 15 m/s 、 $^{-1}$ 风向朝向卫星的情况。

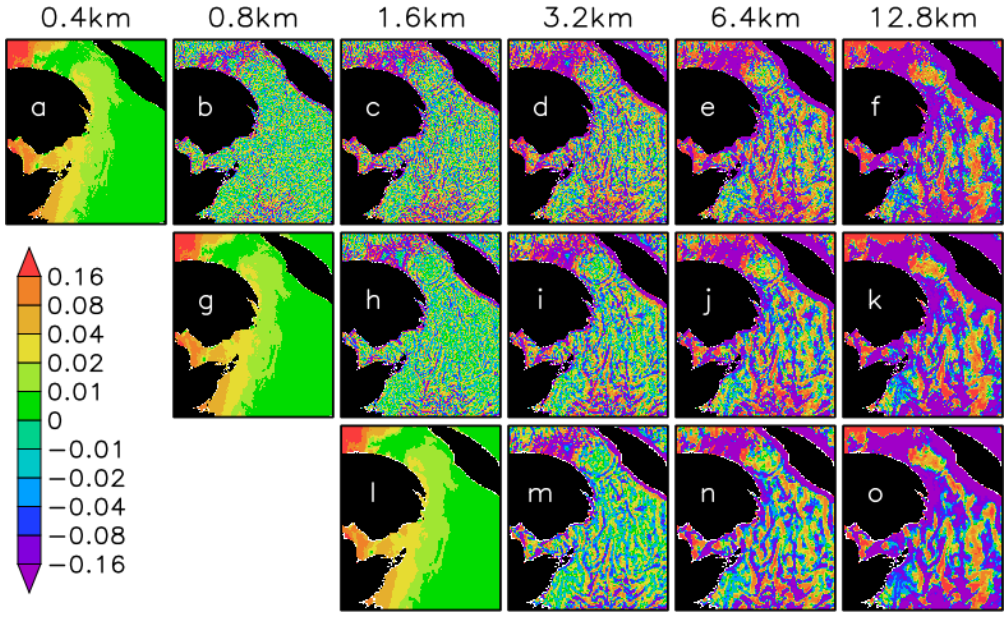

图 3：2019年7月26日（21:59 协调世界时）在圣劳伦斯湾上空获取的 Radarsat-2 场景（HH）的归一化雷达后向散射截面（$\sigma_\circ$）和合成孔径雷达对比度方程（1），以线性单位表示，并采用不同像素分辨率。图中显示的是 $\sigma_\circ$。a) 分辨率为 0.4 km 的结果，以及对比度分辨率最高为 b) 0.8 km、c) 1.6 km、d) 3.2 km、e) 6.4 km 和 f) 12.8 km 的结果。同样， $\sigma_\circ$。g) 展示了分辨率为 0.8 km 的结果，对比度分辨率从 h-k) 的 1.6 km 到 12.8 km；l) 展示了分辨率为 1.6 km 的结果，对比度分辨率从 m-o) 的 3.2 km 到 12.8 km。数值见左侧色标。

2.3 表面风场分析

如果风速不依赖于（或同化）合成孔径雷达后向散射数据，那么合成孔径雷达对比度与风速的依赖关系就更容易解释。因此，距地表10米处的纬向风和经向风分析数据取自第五代欧洲中期天气预报中心再分析资料（ERA5；Hersbach 等，2020年）。该再分析采用谱大气预报模型和序贯资料同化系统，垂直方向分为137层，有效水平分辨率为31千米。四维变分（四维变分）分析以连续的12小时为时段进行。对选定观测结果进行偏差调整，以协调模型与观测结果之间的系统性差异（Dee，2005）。全球大气、陆地表面、海洋表面波演变数据自1950年起按小时提供。

10米风场分析取自一个以0为间隔重新采样的档案。25°，并选取三个采样位置（图中红色方框2）作为安蒂科斯蒂、Gasp´e和谢迪亚克区域具有代表性的ERA5地表风估计值。（每个区域采用单个网格框较为方便，因为这有助于求解测量模型，且这类模型会用到相邻时次的样本。）我们重点关注相对较强的合成孔径雷达对比度，这类对比度表明海洋流汇聚，且可能因表面活性剂的存在而增强（Munk 等（2000）；Rascle 等，2020年）。因此，在各区域与合成孔径雷达对比度进行共定位时，风速限定为1–10 ms^{-1}。此处保留1–3 ms^{-1} 的数值，以纳入强对比

度（即ERA5弱风估计值近似；参见图1）。

3 方法

北大西洋露脊鲸猎物的聚集可能只部分分布在给定的合成孔径雷达场景中，但表面粗糙度中显而易见的动力联系为我们的搜索提供了更明确的方向。观测结果和模型促使我们进行SAR风速校正，但在此，我们寻求一种针对我们选择两种测量值（即图中相干对比度和ERA5 风速。2 所示区域）。首先，我们确认对比度幅值依赖于风速。其次，由于这种部分关系预计是非线性的（例如，Kudryavtsev 等人（2012b））， 我们评估风速的某个幂次对其依赖关系的影响。使依赖关系最强的幂次被视为恰当的幂次。我们的实验设计和拟议调整依赖于：a）识别相干的SAR对比；b）衡量其对风速依赖关系的强度。

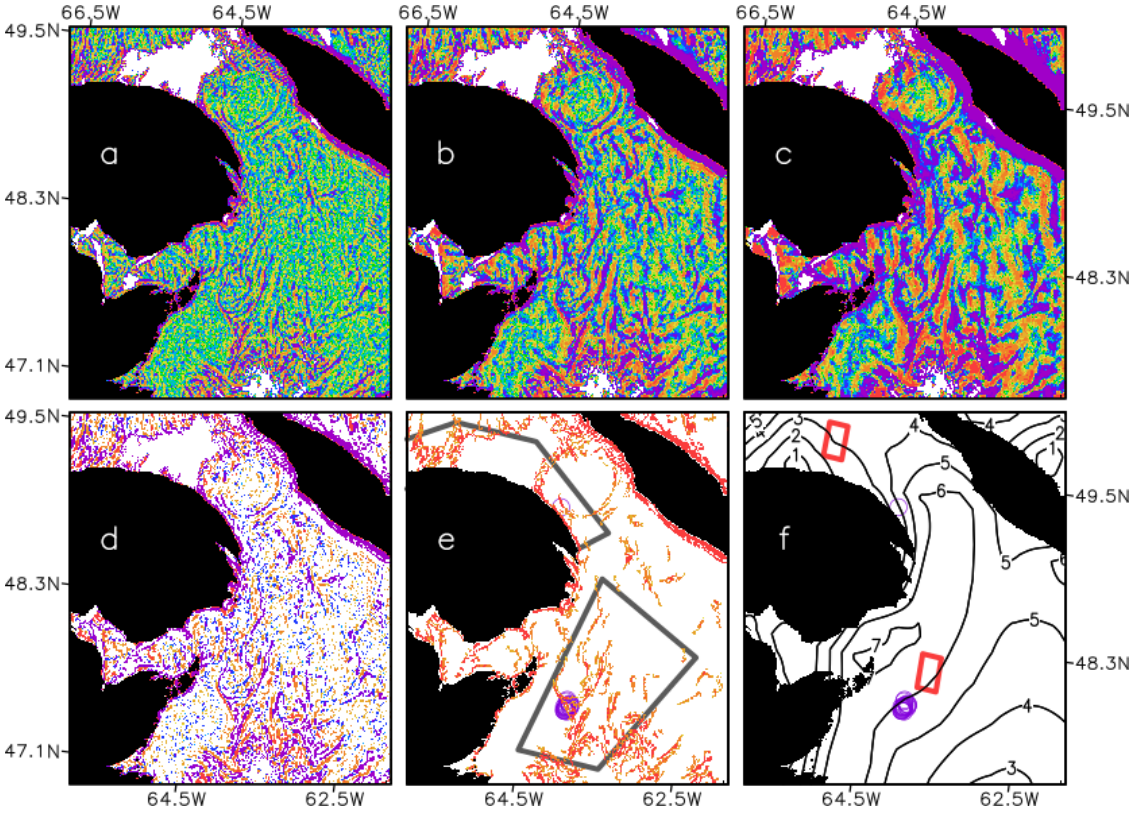

图4：丝状结构处理与 ERA5 风速，其中 (a、b、c) 与图 3h、i、j 相同，但加入了合成孔径雷达风速掩膜（见正文）。此外还展示了：d) 对 (a、b、c) 中符号相同且幅值大于 0.3 的对比度值取平均；e) 由 (d) 中连续值定义的丝状结构的对比度幅值，这些连续值覆盖的距离至少为 10 km；f) ERA5 10 米风速，间隔为 1 米/秒$^{-1}$ 。 (a–e) 中的数值采用线性单位，颜色与图 3相同。(e) 和 (f) 中还标出了当天（2019年7月26日）的露脊鲸目击记录（紫色圆圈）， 以及图 2中 (e) 的合成孔径雷达范围（灰色）和 (f) 的 ERA5 范围（红色）。

3.1 丝状结构相干性

在探讨如何识别合成孔径雷达图像中的粗糙度特征时，Young 等人（2008年）指出：“在特征提取之后……手动识别现象会更容易……而在像素聚合之后则更容易。”这里，方程（1）中的合成孔径雷达对比度被视为能够捕捉（或提取）感兴趣的特征，但在对哲水蚤属热点进行搜索（人工或其他方式）时，也可以考察其连贯性（或像素聚合）。尽管324幅圣劳伦斯湾合成孔径雷达场景中有286幅（88%）采用VV极化，但此处不考虑单独的HH风速调整，因为方程（1）中的局部合成孔径雷达测量对比度以HH或VV比值表示。我们将连贯性定义为相邻的对比区域，其跨度几乎达到一个中尺度涡旋（

（Munk 等（2000）），距离至少为10公里。按照 Kudryavtsev 等人（2012b），σ_o 和 σ_o 可以分别取移动窗口（例如250米和25公里）的平均值。尽管此类箱式平均可能包含各种精细尺度结构（即大致相当于100米至6.4公里标称像素分辨率之间的尺度；Koch（2004）），初步考察不同分辨率区间有助于确定所关注丝状结构的形状和范围。

在 σ_o 和 σ_o之间，针对 100 m 至 12800 m 的一分辨率，共有 28 种可能的组合。图 3 展示了其中 12 种组合，所用数据来自 2019年7月26日获取的一个合成孔径雷达场景。正如预期，大尺度对比度模式主要随 σ_o变化，因此各列面板相似。不过，在 800 m（图 3）和 12800 m（图 3）分辨率下，bf,k,o似乎分别未能充分或过度捕捉这一大尺度模式。因此，我们选择在不同结果的对比度一致之处定义丝状结构，例如图 4a、b、c 所示。也就是说，我们将 σ_o 用于 800 m 分辨率，并将 σ_o用于 1600 m、3200 m 或 6400 m 的像素分辨率。这里所说的一致，是指这三个对比度值的均值，但仅限于它们均为正或均为负，且幅值均大于 0.3 的情况。这三个重叠分辨率区间之间的一致性有助于分离出连续的对比度区域（图 4d），随后从中识别出延伸距离至少为 10 km 的丝状结构（图 4e）。为与具有代表性的 ERA5 风速值（图 4f 中的红框）进行比较，我们通过对每个合成孔径雷达场景中的重叠区域取均值，为圣劳伦斯湾的三个区域分别计算一个对比度幅值。由于丝状结构以外的重叠区域值设为零，因此只有丝状结构内部的值会对区域均值产生非零贡献。

图 4 有助于说明为何需要在单个合成孔径雷达场景内对风速进行校正。图 4e 中（紫色圆圈）聚集着 21 条北大西洋露脊鲸目击记录，沿着丝状体分布；这些丝状体似乎勾勒出加斯佩´海流向南侵入谢迪亚克谷的边界。再往上游，在加斯佩´半岛与安蒂科斯蒂岛之间，可以看到加斯佩´海流一次大规模反气旋性偏移的特征（即当天的 Altika 过境显示海面高度异常为正；未显示）。反气旋性偏移和谢迪亚克侵入区与相对较强的风速位置重合（图 4f），且边界仅由丝状体隐约勾勒。另一方面，在鲸群更南面有一个气旋涡，周围环绕着大范围的丝状结构，但这些结构部分被遮蔽（图 4a、b、c）。同样，加斯佩´海域的一部分也因风速较弱而被遮蔽。另——

虽然在 σ_o 降低的区域丝状结构分布广泛，但在有鲸出没的地方寻找 哲水蚤属 聚集可能更容易成功（Kenney 等人（2001）；Baumgartner 等，2007）。在这种情况下，相较于弱风区域，强调强风区域对比度的校正似乎是合理的。

3.2 依赖性度量

Sz´ekely 等人 (2007) 和Sz´ekely 与 Rizzo (2009) 提出了一种称为距离相关的依赖关系度量，它能够检测非线性和非单调的测量协方差，因此拓展并补充了皮尔逊相关。皮尔逊相关主要被视为线性依赖的度量，但也可以构建一种波状测量模型，以同时容纳线性和非线性依赖（Danielson 等人，2018年、2020）。如第5节所述，自相关为波状模型解提供了依据。对于图 2所示区域内的 SAR 对比度幅度（C）和 ERA5 风速（U），模型、方差和交叉协方差分量为

$$\begin{aligned} C &= t + \epsilon + \epsilon_C \\ U &= \alpha_U + \beta_U t + \epsilon + \epsilon_U \\ Var(C) &= \sigma_t^2 + \sigma_\epsilon^2 + \sigma_C^2 \\ Var(U) &= \beta_U^2\sigma_t^2 + \sigma_\epsilon^2 + \sigma_U^2 \\ Cov(C,U) &= \beta_U\sigma_t^2 + \sigma_\epsilon^2. \end{aligned} \tag{2}$$

该模型将线性关联（t）、非线性关联（ϵ）和缺乏关联（ϵ_C 和ϵ_U）作为信号与噪声项引入（但其解释基于信号），其方差分别为 σ_t^2、 σ_ϵ^2、 σ_C^2和 σ_U^2。可以说，这一框架将测量值相互关联起来，但仅限于它们共同测量的内容。因此， $t+\epsilon$（在 C中）和 $\alpha_U+\beta_U t+\epsilon$（在 U中）刻画了 C 和 U之间的总体关联，其中 α_U 和 β_U 分别是对 U中 t 的加性和乘性校准。

SAR 对比度幅度（C）对 ERA5 风速（U）的依赖关系，可以通过皮尔逊相关和距离相关来衡量。皮尔逊相关的一种新型分解 $[\rho = Cov(C,U)/\sqrt{Var(C)Var(U)}]$ 也可由$Cov(C,U)$的线性（$\beta_U\sigma_t^2$）和非线性（σ_ϵ^2）分量表示。下文给出了各分量的多个解，这些解基于间隔为 1 小时至 5 小时的 ERA5 风速采样（参见第5节）。求解方程（2）所需的两个关键参数是 β_U和 σ_t^2；为获得平滑解，固定其中一个参数较为方便。尽管 Danielson 等人（2018年）固定了 β_U，但本文将 σ_t^2 固定为 $Cov^2(C,U)/Var(U)$的反向线性回归值。

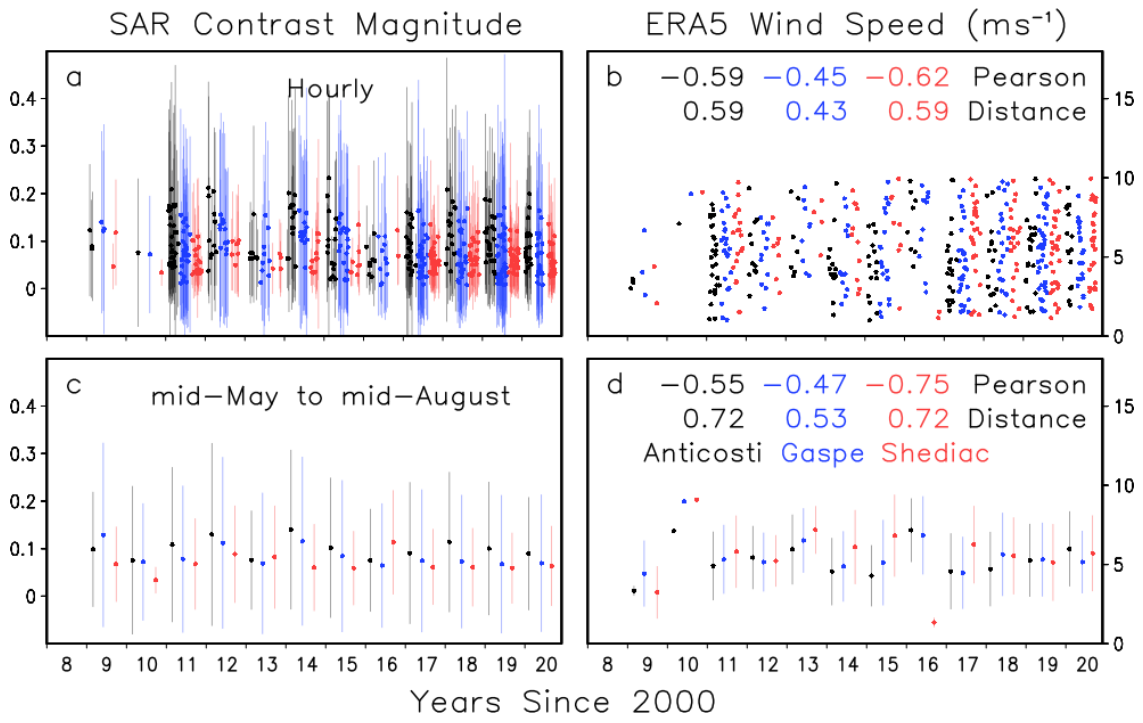

图5：2008年至2020年五月中旬至八月中旬期间，图C 2中安蒂科斯蒂（黑色）、加斯U 佩$^{-1}$（蓝色）和谢迪亚克（红色）区域的 a、c）SAR 对比度幅度（′线性单位）和 b、d）ERA5 风速（m/s）。安蒂科斯蒂和谢迪亚克的数据分别向前和向后平移了3.5个月。图中展示了 a、b）各区域每次卫星过境（按小时分箱）的平均值，以及 c、d）五月中旬至八月中旬所有过境数据的平均值（按年度统计；圆点及其上下方表示一个标准差的线段），并给出了各区域和时间区间对应的皮尔逊相关值和距离相关值。

图中每个区域内的依赖关系2 通过计算以下两者的相关性进行考察： C 和 U^x，其中 x 是一个取值范围为 [-5,5]的变量指数。 x^* 取使相关性最强的值，作为合适的风速校正值。由于两者的关系是反向的（例如，强对比度往往出现在弱风条件下），我们将三个 SAR 对比度值分别乘以 $(V/6)^{x^*}$，其中 V 是跨场景插值的风速（即应用于 800 米分辨率下的对比度，并将$\sigma_{\circ}$应用于 1600 米、3200 米和 6400 米像素分辨率下的对比度，包括图中区域之外的部分。2）。此外，由于皮尔逊相关和距离相关均不依赖于 C （Sz´ekely 等人，2007年）的乘性校准，我们将任意归一化（$1/6$）$^{x^*}$ 也纳入此校正中，因此风速为 6 米/秒时的对比度值保持不变。

4 结果

北大西洋露脊鲸在圣劳伦斯湾的觅食活动可延续至秋季（NARWC（2021）；DFO（2020）），但我们关注的是合成孔径雷达五月中旬至八月中旬的场景，此时风速较低，且哲水蚤属在近海面处可能更为密集（Brennan 等，2021；Sorochan 等人（2021））。从季节平均值（图5c、d）中比从单次过境观测（图5a、b）更容易看出其与 ERA5 风速的依赖关系。例如，在合成孔径雷达覆盖良好的年份，谢迪亚克区域的风速往往较大（图5d 中的红点），而对比度幅值则较小（图5c），相较于其他区域皆是如此。正如预期，皮尔逊相关性始终为负。距离相关的取值范围仅为 0 到 1（即 0 表示相互独立）；加斯佩′区域的距离相关略低，部分原因或许是其 ERA5 网格框对相应合成孔径雷达区域内整体风速的代表性较差（图2）。尽管如此，皮尔逊相关性和距离相关性似乎都与观测结果（Espedal 等（1998）；Munk 等（2000））以及模型预测（Kudryavtsev 等，2012a，b）相符：丝状体对比度依赖于风速。

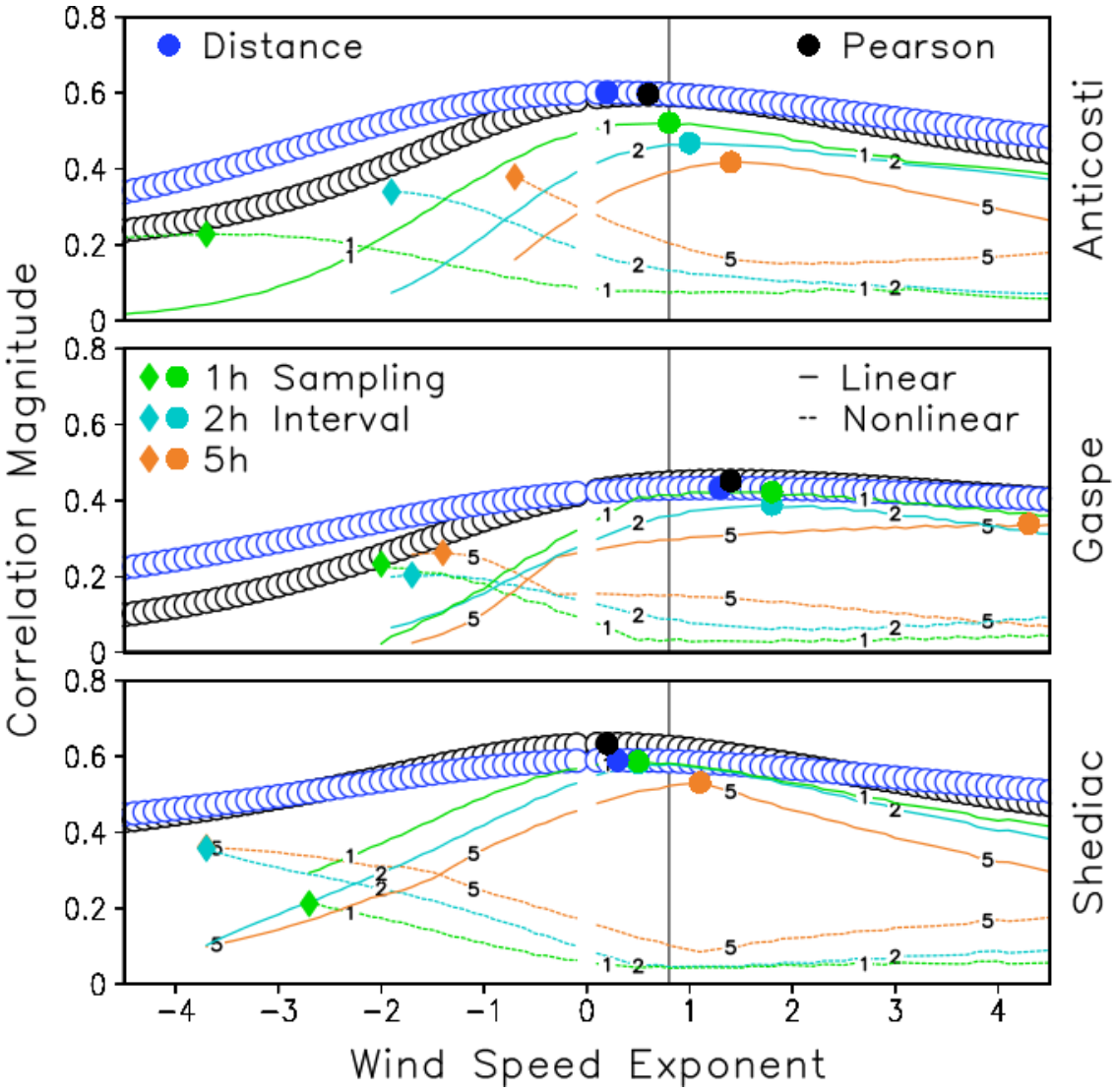

图6：Radarsat-2 合成孔径雷达对比度幅度（C）对 ERA5 风速（U^x）的依赖关系随风速指数（x，横坐标）的变化，展示安蒂科斯蒂（上）、Gasp´e（中）和谢迪亚克（下）区域。图中显示距离相关（蓝色圆圈）和皮尔逊相关（黑色圆圈）的幅度，以及基于方程（2）的解所计算的皮尔逊相关线性（实线）和非线性（虚线）分量；这些解采用了额外四个样本，分别以 1 小时（绿色）、2 小时（青色）和 5 小时（橙色）为间隔获取 ERA5 风速。实心圆圈和菱形表示最大值。在 $x = 0.8$ 处的竖线标示拟议调整。

图 6 展示了（C， U^x）相关强度随风速指数（x）变化的情况，数据为图5a、b 中按小时分箱的合成孔径雷达和 ERA5 数据。排除了指数为零的值以及任何不可用的分量解。在所有指数范围内，距离相关的数值似乎比皮尔逊相关更为接近（即变化更平缓）。大多数相关性极小值出现在较大的负指数处。皮尔逊相关和距离相关的极大值（实心圆）与图5b 中列表所示的数值（指数为 1 时）相近，但通常出现在小于 1 的指数处。至少在加斯佩和谢迪亚克区域，皮尔逊相关的极大值高于距离相关，其程度符合二元正态数据的预期（Sz´ekely 等，2007 年，其图 1）。这与 U^x 在范围 x 内的分布偏度较小相一致 [0,2]（未显示）。

在偏离最大值时，距离相关的幅度大于皮尔逊相关，这似乎与其对非线性和非单调依赖更敏感相一致（Sz´ekely 等人 2007年）。在固定 σ_t^2的情况下，方程（2）的解并非总是存在；但在皮尔逊相关包含非线性成分的情形下（实心菱形），距离相关的较大值也表明存在非线性依赖。因此，在本研究中，皮尔逊相关与距离相关似乎相当一致。两者都表明，风速校正应采用一个较小的正指数，该指数接近占主导地位的线性依赖，但略微偏向次要的负向非线性依赖（在采样间隔较短时尤为如此）。还值得注意的是，图 6 中的线性和非线性相关最大值无法与 Kudryavtsev 等人(2012b) 的合成孔径雷达对比度公式直接比较，但使用摩擦速度而非风速可能有助于进行更直接的比较。

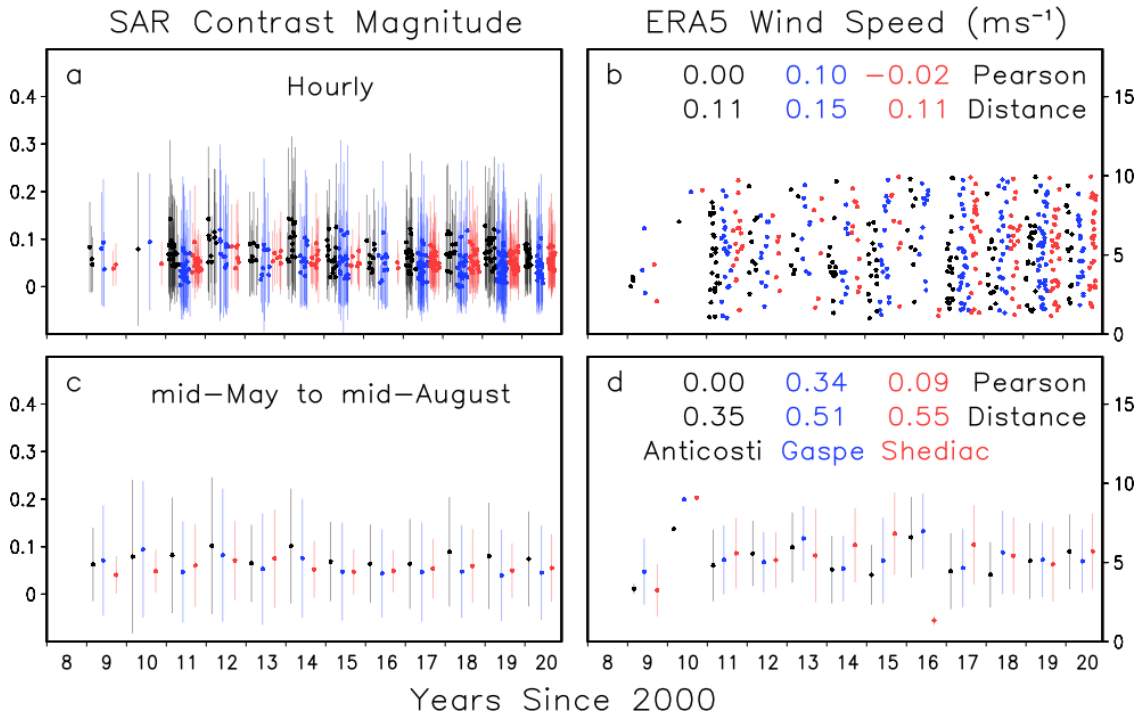

图7：与图 5相同，但对 SAR 对比度幅度进行了调整。

图 $x = 0.8$ 6 中的垂直线为圣劳伦斯湾的三个区域提供了一种折中方案。我们将 SAR 对比度乘以（$V/6$）$^{0.8}$，以实现增强或减弱，具体取决于 ERA5 风速匹配值（V）是否分别大于或小于 6 ms^{-1}。此操作在识别相干丝状结构（第 3.1节）之前进行，并会降低合成孔径雷达对比度幅度的均值和方差（图 7a、c）。皮尔逊相关和距离相关均降至小于 0.2 的值（图 7b），而大于 0.8 的指数值并不会导致相关性同样降低（未显示）。这表明，我们的调整主要降低了线性依赖，但在一定程度上也

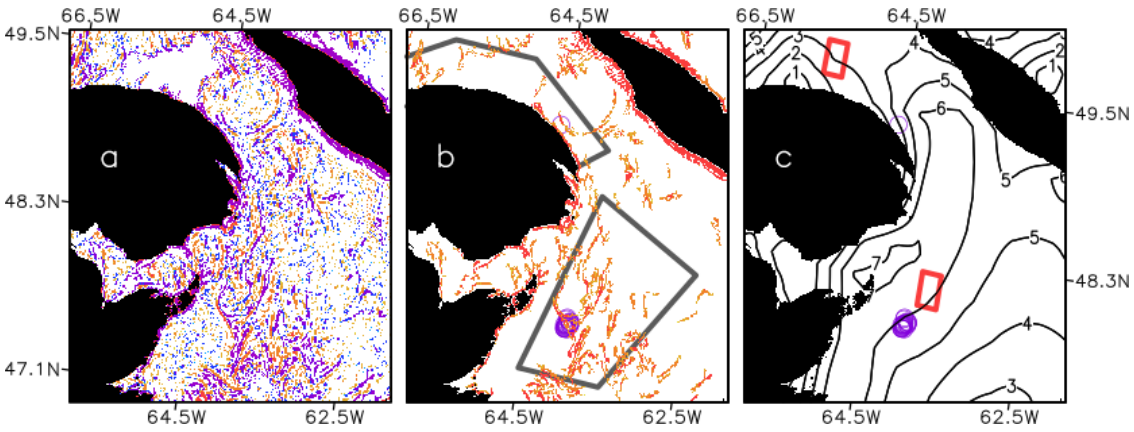

图 8：与图 4d、e、f 类似，但对合成孔径雷达对比度幅度进行调整后。

在非线性依赖关系中。对于 7 月 26 日的场景，2019 年（图 8），沿向南侵入的方向排列的丝状结构加斯佩洋流侵入谢迪亚克海域的过程中′，main，同时，小型，也变得更加常见。 A 场景边界处弱风对比度的有利降低也很明显。 在这种情况下，感兴趣的瞬态水团边界看起来基本没有变化，但标示这些边界的丝状结构走向更容易辨认以便识别。 尽管合成孔径雷达对比度方差仍然较大（图7a、b），但简单的调整能使各个场景之间更加均匀。

5 讨论

边界层环流可能为丝状结构提供初始组织，随后这些丝状结构沿水团应变线聚集，形成广泛的连接（Munk 等（2000）；Peacock 和 Haller 2013年；Maps 等人 2015年）。Dong 等人 （2021）提出，这类瞬态物质边界能够促进浮游动物聚集。然而，在相对较大的尺度上（即大于 O[10公里] 涡旋），典型的生物聚集合成孔径雷达特征，尤其是依赖于 哲水蚤属 运动能力的特征，尚未被提出（即包括浮游动物维持自身深度，或以其他方式在水柱中定位自身的能力）。Sorochan 等人 （2021）指出，水平和垂直方向上的聚集都很重要，无论是在近表层还是深层。相应地，预计会出现与合成孔径雷达丝状结构几乎重合的聚集，如图 8 所示；也会出现由连贯的水团边界界定、但不一定与其重合的聚集，如图 1 所示。尽管水柱中存在许多合成孔径雷达能够感知的过程（Holt，2004；McWilliams 等人 2009；Shen 等人 2020），方程（1）中的对比度在有针对性地寻找北大西洋露脊鲸猎物聚集时，它似乎也能提供重要的空间参考。

沿丝状结构和物质边界发生的过程也是这项研究的关键，尽管 Ras- cle 等 （2020年）强调，我们区分主动辐合丝状结构与衰减丝状结构的能力有限。要从太空中识别聚集过程（即回答什么是聚集），这一区分是必要的；但它在一定程度上也不同于如何最好地利用给定平台对这些过程进行测量的问题。对于我们在此能够解析的尺度，本文提出风速的非线性依赖有所减弱。 Sz´ekely 和 Rizzo （2009）指出，将距离相关分解为线性分量和非线性分量是理想的。由于自相关涉及方程（2）的解，而该方程在皮尔逊相关中实现了这种分解，因此有必要补充几点说明。图 5-7 中的所有相关值均基于两种时间自相关假设获得：超过 12 小时时，自相关较弱（对合成孔径雷达对比度而言更为合理，而对 ERA5 风速而言则不然）；在 12 小时以内，自相关较强（对 ERA5 风速而言更为合理，而对合成孔径雷达对比度而言则不然）。第一种假设允许使用标准相关计算，此时将每个时间序列样本视为相互独立会较为方便。我们注意到，在图 5所示的每个区域内，少数合成孔径雷达场景的获取时间间隔不到 12 小时，但大多数场景之间的间隔较长。

第二个假设是通过在每次合成孔径雷达过境前后各采样两次 ERA5 风速，求解方程（2）的基础。与Danielson 等人(2018年)一样，可以写出一个涉及自相关样本（即自相关呈波状）的波状测量模型。对于 1 小时至 5 小时的采样间隔，最外侧的样本分别位于前后 2 小时和 10 小时处。因此，ERA5 小时数据允许求解方程（2），且其

12 小时内的自相关更为稳健，因此这一假设似乎也合理。

关于 SAR 对比度非线性的成因，我们认为，除对风速的依赖关系外，还存在一种与表面活性剂性质有关的混杂（或未观测到的）依赖关系。引言中也暗示了表面活性剂的存在，此外还有一些值得关注的一般性评论。Li 等Li 等（2019）和Huang 等（2022 年）介绍了原油等海面油膜 SAR 成像技术的最新进展。由于具备高分辨率、大面积覆盖以及全天候、昼夜均可工作的能力，SAR 是监测海洋表面油膜的有效卫星传感器。海洋表面的表面活性剂往往会抑制风所产生的表层短重力波和毛细波，而这些波浪正是雷达后向散射的来源。黏度增加、表面张力降低会导致这种抑制作用，显著减弱雷达后向散射，从而使合成孔径雷达图像中出现暗斑。SAR 检测海面油膜的一项难点在于，其他自然的“相似现象”也会与之混淆；这些现象同样可能减弱雷达信号，进而形成暗区（例如图 1）。这类相似现象包括低风速区域、生物成因油膜、雨胞、初生冰或冰晶海冰、表层流切变、海岸附近的风影区、上升流区和内波（Alpers 等，2017）。

早期研究采用阈值法和统计分类器，利用单极化SAR强度图像识别海面油膜（Fiscella等，2000）。然而，由于斑点噪声以及从近距到远距雷达后向散射的异质性，使用简单的图像强度阈值法，很难将暗斑与洁净的海洋表面区域准确分割。在低风速条件下采用自适应阈值方法时，暗斑分割结果可能包含许多相似目标。因此，为了改进海面油膜检测，通常需要额外的先验知识，例如海洋表面风况等（Mera等，2012）。无论如何，这些方法都需要经过复杂的处理流程才能实现海面油膜检测和分类。

与仅提供雷达回波强度的单极化合成孔径雷达数据相比，全极化SAR测量目标的散射矩阵，从而为每个图像像素提供振幅和相位数据。因此，四极化SAR可以基于极化分解理论估计特征参数，从而区分与海面油膜相关的不同散射机制。例如，全极化C波段SAR也被用于识别溢油，采用了同极化相位差等各种极化特征（Nunziata等，2013；Zhang等，2011）。然而，四极化SAR并不适用于业务监测，因为其覆盖范围太小（25或50公里），而单极化和双极化SAR的覆盖范围更大（300公里或500公里）。不过，当波浪阻尼行为过于相似时，仍有时无法将海面油膜与相似目标区分开来。即使能够区分，表面活性剂也可能导致图6中的非线性。

6 结论

北大西洋露脊鲸的出现仍是高浓度哲水蚤属 的最佳指示之一，但鉴于圣劳伦斯湾（GSL）中哲水蚤属的供应量，我们是否也可以说，猎物聚集是北大西洋露脊鲸出现的指示？关于测量中聚集区的划定，利用合成孔径雷达对比度探究海流表面形变似乎依据充分（Kudryavtsev 等，2012a；Rascle 等人（2014））。然而，观测结果和模型预测，合成孔径雷达对比度与风强迫和海况呈反向依赖关系，至少在风速为 1–10 ms^{-1} （Espedal 等（1998））。例如，在谢迪亚克谷，自2015年起北大西洋露脊鲸的目击频率更高；与圣劳伦斯湾的其他区域相比，该处合成孔径雷达对比度较弱，而风速较强。

2010年代，圣劳伦斯湾西部的合成孔径雷达覆盖总体有所改善，Radarsat- 2 在2019年捕捉到了约三分之一的鲸目击记录。聚焦于五月中旬至八月中旬（2008-2020年）的场景，使我们能够刻画风速较低且哲水蚤属可能间歇性聚集在近表层时，合成孔径雷达与风的关系。我们对合成孔径雷达测量对比度的定义遵循Kudryavtsev 等人（2012b），但采用三个相互重叠的分辨率区间之间的一致性来识别连续的对比特征。跨度至少为10 km（接近涡旋长度尺度；Munk 等（2000））的特征，其在安蒂科斯蒂、加斯佩´或谢迪亚克区域重叠部分的对比度幅值被纳入平均值计算。

测量建模被引入，作为雷达成像模型和生态系统模型的补充，这些模型与更广泛的一组测量结果相符，或能给出海气界面处 SAR 对比度的一般表达式。本研究利用皮尔逊相关和距离相关，重点考察 SAR 对比度幅度与 ERA5 风速幂次之间关系的强度（Sz´ekely 等，2007年；Sz´ekely 和 Rizzo，2009）。由于距离相关对非线性和非单调依赖敏感，因此它与 SAR 对比度的一般表达式更为一致（例如，包括表面活性剂、海况和风向），

其中也考虑了非线性关联和无关联的情况，以及皮尔逊相关的线性分量和非线性分量。

风速的正幂与对比度幅值的相关性最强，皮尔逊相关和距离相关的结果也一致。两者都接近主要的线性依赖，但略微偏向次要的非线性依赖；这一点可从皮尔逊相关中的非线性贡献以及相对较大的距离相关值看出。由此得到一种简单的合成孔径雷达对比度加权方法，其对所有圣劳伦斯湾子区域的相关性影响均小于 0.2。因此，通过使对比度幅值更加均匀（或降低其对风速的依赖），或许可以更好地探究一组合成孔径雷达图像中的北大西洋露脊鲸猎物聚集（如果有红外/彩色图像，也可能包括太阳耀斑）。此外，界定圣劳伦斯湾生物聚集的典型合成孔径雷达特征时，也应参考质量与运动对比度的补充测量值（例如 Basedow 等，2019；Barthelmeß 等，2021），以及对哲水蚤属可利用性的观测和模拟测量值 等。供应量（Gavrilchuk 等，2020；Brennan 等，2021）。

致谢

Hilary Moors-Murphy、Catherine Brennan、Kevin Sorochan、三位匿名审稿人以及副编辑提出的意见对我们的论文呈现帮助很大。我们感谢北大西洋露脊鲸联盟和加拿大渔业与海洋部的 Team Whale 在收集和质量控制圣劳伦斯湾鲸目击记录方面所做的努力。Radarsat 数据由 MacDonald, Dettwiler and Associates Ltd. 制作，并从加拿大自然资源部地球观测数据管理系统获取。哨兵-1 数据来自欧盟和欧洲空间局的哥白尼计划。ERA5 数据取自哥白尼气候变化服务（C3S）气候数据存储库。我们感谢 M. Rizzo 和 G. Sz´ekely 提供距离相关性 R 软件包（energy）。经费由加拿大渔业与海洋部的竞争性科学研究基金（CSRF）和濒危物种计划（亦称 SAR）提供。

参考文献

Alpers, W., Holt, B., Zeng, K., 2017. 利用成像雷达检测溢油：挑战与陷阱。《遥感环境》201, 133–147。

Barthelmeß, T., Sch¨utte, F., Engel, A., 2021. 丝状体边缘海洋表面微层的变化及其对气体交换的潜在影响。Front. Mar. Sci. 8, 1–21, doi:10.3389/fmars.2021.718384。

Basedow, S. L., McKee, D., Lefering, I., Gislason, A., Daase, M., Trudnowska, E., Egeland, E. S., Choquet, M., Falk-Petersen, S., 2019. 浮游动物群的遥感。Sci.Rep.9, 1–10, doi:10.1038/s41598– 018–37129–x。

Baumgartner, M.F., Mayo, C. A., Kenney, R. D., 2007年。体型巨大的食肉动物、微小的食物，以及难以找到的餐馆，《城市鲸：十字路口上的北大西洋露脊鲸》，S. D. Kraus 和 R. M. Rolland 编，哈佛大学出版社，138–171，doi:10.2307/j.ctv1pnc1q9.10。

Brennan, C. E., Maps, F., Gentleman, W. C., Lavoie, D., Chass´e, J., Plourde, S., Johnson, C. L., 2021。海洋环流变化导致北大西洋露脊鲸觅食栖息地中的哲水蚤属 丰度发生变化：冷年和暖年情景的模型比较。《海洋学进展》197，1–18，doi:10.1016/j.pocean.2021.102629。

Cochran, W. G., 1972年。观察性研究，《纪念*George W. Snedecor*的统计论文集》，T. A. Bancroft 编，爱荷华州立大学出版社，第 77–90 页，2015年重印，doi:10.1353/obs.2015.0010。

Danielson, R. E., Johannessen, J. A., Quartly, G. D., Rio, M.-H., Collard, F., Chapron, B., Donlon, C., 2018年。大型分析验证中的误差相关性利用：GlobCurrent案例研究。《遥感环境》217，476–490，doi:10.1016/j.rse.2018.07.016。

Danielson, R. E., Zhang, M., Perrie, W. A., 2020. 气候变化可能对北极和北大西洋亚极地地区雾况造成的影响。《高级统计、气候与气象海洋学》475, 1–19, doi:10.5194/ascmo–6–31–2020。

Dee, D. P., 2005. 偏差与资料同化。《皇家气象学会季刊》131, 3323–3343, doi:10.1256/qj.05.137。
DFO, 2020. 加拿大渔业与海洋部达特茅斯新斯科舍省的鲸鱼目击数据库，Team Whale[20201202]。
Dong, H., Zhou, M., Hu, Z., Zhang, Z., Zhong, Y., Basedow, S. L., Smith Jr., W. O., 2021. 早春罗弗敦陆架上的输运屏障与大西洋桡足类的滞留。《地球物理研究杂志：海洋》126, 1–18, doi:10.1029/2021JC017408。Edelmann, D., M´ori, T. F., Sz´ekely, G. J., 2021. 论皮尔逊相关系数与距离相关系数之间的关系。《统计与概率快报》169, 1–6, doi:10.1016/j.spl.2020.108960。Espedal, H. A., Johannessen, O. M., Johannessen, J. A., Dano, E., Lyzenga, D. R., Knulst, J. C., 1998. COASTWATCH' 95：ERS 1/2合成孔径雷达对海洋表面天然表面膜的检测。《地球物理研究杂志：海洋》103, 24969–24982, doi:10.1029/98JC01660。Fiscella, B., Giancaspro, A., Nirchio, F., Pavese, P., Trivero, P., 2000. 利用海洋合成孔径雷达图像进行溢油检测。《国际遥感杂志》21, 3561–3566。

Gavrilchuk, K., Lesage, V., Fortune, S., Trites, A. W., Plourde, S., 2020年。采用机制方法预测圣劳伦斯湾性成熟北大西洋露脊鲸的适宜觅食栖息地。DFO Can.Sci. Advis. Sec. Res. Doc. 2020/034. iv + 47页。

Hamilton, B., Dean, C., Kurata, N., Vella, K., Soloviev, A., Tartar, A., Shivji, M., Matt, S., Perrie, W., Lehner, S., Zhang, B., 2015年。海洋表面微层中的表面活性剂相关细菌：佛罗里达海峡和墨西哥湾的案例研究。《加拿大遥感杂志》41, 135–143, doi:10.1080/07038992.2015.1048849。

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Hor´anyi, A., Mu˜noz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., De Chiara, G., Dahlgren, P., Dee, D., Diamantakis, M., Dragani, R., Flemming, J., Forbes, R., Fuentes, M., Geer, A., Haimberger, L., Healy, S., Hogan, R. J., H´olm, E., Janisková, M., Keeley, S., Laloyaux, P., Lopez, P., Lupu, C., Radnoti, G., de Rosnay, P., Rozum, I., Vamborg, F., Villaume, S., Th´epaut, J.-N., 2020年。ERA5全球再分析。Quart. J. Roy. Meteor. Soc. 146,1999–2049，doi:10.1002/qj.3803。

Hersbach, H., Stoffelen, A., de Haan, S., 2007年。一种改进的C波段散射计海洋地球物理模型函数：CMOD5。《地球物理研究杂志》112，doi:10.1029/2006JC003743。

Holt, B., 2004年。海洋表面的SAR成像，美国国家海洋和大气管理局合成孔径雷达海洋用户手册，C. R. Jackson 和 J. R. Apel 编，美国商务部，第25–79页（访问于2022年8月，网址：https://www.sarusersmanual.com）。

Huang, X., Zhang, B., Perrie, W., Lu, Y., Wang, C., 2022年。一种利用卫星合成孔径雷达图像检测海洋溢油的新型深度学习方法。《海洋污染通报》179，doi:10.1016/j.marpolbul.2022.113666。

Kenney, R. D., 2019。《北大西洋露脊鲸联盟数据库：用户和贡献者指南》（访问时间：2021年1月，网址：https://www.narwc.org/uploads/1/1/6/6/116623219/narwcusers guide v 6 .pdf）。

Kenney, R. D., Mayo, C. A., Winn, H. E., 2001年。北大西洋西部露脊鲸在不同空间尺度下的迁徙和觅食策略：假说综述。《鲸类研究与管理杂志》（专刊）2，251–260，doi:10.47536/jcrm.vi.283。

Koch, W., 2004。旨在确定风向的SAR图像方向分析。《IEEE地球科学与遥感汇刊》42, doi:10.1109/TGRS.2003.818811。

Koutitonsky, V. G., Bugden, G. L., 1991。圣劳伦斯湾的物理海洋学：综述，重点讨论运动的天气尺度变化，第57–90页。小海洋还是大河口？《加拿大渔业与水生科学特刊》113。Kudryavtsev, V., Akimov, D., Johannessen, J., Chapron, B., 2005。海流特征的雷达成像：1. 模型及与观测结果的比较。《地球物理研究杂志》110，1–27，doi:10.1029/2004JC002505。Kudryavtsev, V., Myasoedov, A., Chapron, B., Johannessen, J. A., Collard, F., 2012a。利用合成孔径雷达和光学数据成像中尺度上层海洋动力学。《地球物理研究杂志》第117卷，doi:10.1029/2011JC007492。Kudryavtsev, V., Myasoedov, A., Chapron, B., Johannessen, J. A., Collard, F., 2012b。太阳耀斑与雷达海面油膜联合影像。《遥感环境》120，123–132，doi:10.1016/j.rse.2011.06.029。Kurata, N., Vella, K., Hamilton, B., Shivji, M., Soloviev, A., Matt, S., Tartar, A., Perrie, W., 2016。海洋近表层中的表面活性剂相关细菌。《科学报告》6，19123，doi:10.1038/srep19123。Lavoie, D., Simard, J. C. Y., Lambert, N., Galbraith, P. S., Roy, N., Brickman, D., 2016。三维数值模型显示的大尺度大气与海洋控制对磷虾输运进入圣劳伦斯河口的作用。《大气—海洋》54，299–325，doi:10.1080/07055900.2015.1082965。Li, H., Perrie, W., Wu, J., 2019。利用紧缩极化合成孔径雷达反演海洋表面的油水混合比例。《遥感》11，816，doi:10.3390/rs11070816。Maps, F., Plourde, S., McQuinn, I. H., St. Onge-Drouin, S., Lavoie, D., Chass´e, J., Lesage, V., 2015。声学与有限时间李雅普诺夫指数的结合揭示了加拿大东部圣劳伦斯湾内磷虾聚集的区域及机制。《湖沼学与海洋学》60，1965–1975，doi:10.1002/lno.10145。McWilliams, J. C., Colas, F., Molemaker, M. J., 2009。冷丝状结构强化与海洋表面辐合线。《地球物理研究快报》36，1–5，doi:10.1029/2009GL039402。Mera, D., Cotos, J. M., Varela-Pet, J., Garcia-Pineda, O., 2012。基于SAR图像和风数据的自适应阈值算法，用于分割伊比利亚半岛西北海岸沿线的溢油。《海洋污染通报》64，2090–2096。Munk, W., Armi, L., Fischer, K., Zachariasen, F., 2000。海洋上的螺旋结构。《伦敦皇家学会会刊A辑》456，1217–1280。NARWC, 2021。截至2021年1月的北大西洋露脊鲸联盟识别与目击数据（存档于美国马萨诸塞州波士顿的新英格兰水族馆，离线存档）。Nunziata, F., Gambardella, A., Migliaccio, M., 2013。SAR海面油膜观测中的偏振度。《国际摄影测量与遥感学会摄影测量与遥感杂志》167，190–200。Palacios, D. M., Baumgartner, M. F., Laidre, K. L., Gregr, E. J., 2013。超越相关性：将环境与行为介导过程整合到海洋哺乳动物分布模型中。《濒危物种研究》22，191–203，doi:10.3354/esr00558。Peacock, T., Haller, G., 2013。拉格朗日相干结构：流体流动的隐形骨架。《今日物理》66，41–47，doi:10.1063/PT.3.1886。Plourde, S., Lehoux, C., Johnson, C. L., Perrin, G., Lesage, V., 2019。北大西洋露脊鲸（北大西洋露脊鲸）及其食物：（I）加拿大水域哲水蚤属生物量和潜在觅食栖息地的空间气候学。《浮游生物研究杂志》41，667–685，doi:10.1093/plankt/fbz024。Rascle, N., Chapron, B., Molemaker, J., Nouguier, F., Ocampo-Torres, F. J., Osuna Ca˜nedo, J. P., Mari´e, L., Lund, B., Horstmann, J., 2020。利用海面粗糙度监测强海洋锋面：卫星、飞机与现场对比。《地球物理研究杂志：海洋》125，1–22，doi:10.1029/2019JC015704。

Rascle, N., Chapron, B., Ponte, A., Ardhuin, F., Klein, P., 2014. 海流的表面粗糙度成像显示了沿风向的辐散和应变。《物理海洋学杂志》44, 2153–2163, doi:10.1175/JPO– D–13–0278.1. Rascle, N., Molemaker, J., Mari´e, L., Nouguier, F., Chapron, B., Lund, B., Mouche, A., 2017. 根据海面粗糙度方向性观测推断海洋锋处的强变形场。《地球物理研究快报》44, 5599–5608, doi:10.1002/2017GL073473. Shen, H., Perrie, W., Johnson, C. L., 2020. 预测缅因湾的内孤立波。《地球物理研究杂志：海洋》125, 1–22, doi:10.1029/2019JC015941. Sorochan, K., Plourde, S., Morse, R., Pepin, P., Runge, J., Thompson, C., Johnson, C. L., 2019. 北大西洋露脊鲸（北大西洋露脊鲸）及其食物：（II）北大西洋西部陆架上哲水蚤属生物量的年际变化。《浮游生物研究杂志》41, 687–708, doi:10.1093/plankt/fbz044. Sorochan, K. A., Plourde, S., Baumgartner, M. F., Johnson, C. L., 2021. 北大西洋露脊鲸（北大西洋露脊鲸）觅食区内猎物（哲水蚤属）的可利用性、供应量和聚集。《国际海洋科学杂志》78, doi:10.1093/icesjms/fsab200. Sz´ekely, G. J., Rizzo, M. L., 2009. 布朗距离协方差。《应用统计年鉴》3, 1236–1265, doi:10.1214/09-AOAS312. Sz´ekely, G. J., Rizzo, M. L., Bakirov, N. K., 2007. 通过距离相关测量和检验依赖关系。《统计年鉴》35, 2769–2794, doi:10.1214/009053607000000505. Young, G., Sikora, T., Winstead, N., 2008. 利用合成孔径雷达绘制中尺度近海面风速变化图。《传感器》8, 7012–7034, doi:10.3390/s8117012. Zhang, B., Perrie, W., He, Y., 2011. 使用新的极化比模型从 RADARSAT-2 四极化图像反演风速。《地球物理研究杂志》116, 1–13, doi:10.1029/2010JC006522.