

基于形态学的海洋锋形态特征提取

薛存金^{1,2,3}, 苏奋振¹, 周军其², 郭衍游⁴, 仇天宇¹

(1. 中国科学院 地理资源研究所 资源环境信息国家重点实验室海洋 GIS 中心, 北京 100101; 2. 武汉大学 遥感信息工程学院, 湖北 武汉 430079; 3. 中国科学院 研究生院, 北京 100039; 4. 中国科学院 海洋研究所, 山东 青岛 266071)

摘要:根据形态学梯度理论: 不同尺寸的结构元素适合不同空间尺度的特征提取, 结构元素尺寸的过大或者过小都会达不到最佳的特征边缘提取效果, 从结构元素的尺寸 δ 与海洋锋横断面宽度 γ 和海流流幅的空间尺度 λ 的理论关系图推导中, 提出 δ , γ 和 λ 的最佳定量关系: $\delta = \gamma/2$, 且 $\delta \leq \lambda/2$, 旨在对海洋锋形态特征进行提取。最后, 以黑潮和墨西哥湾流为实验数据, 进行海洋锋形态特征的自动提取, 实验结果表明该定量关系的正确性和有效性。

关键词:海洋锋; 结构元素尺寸; 形态学梯度; 特征提取; 海洋地理信息系统

中图分类号: TP391.41

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096 (2008) 05-0057-05

从遥感要素场中分析流场一直是海洋遥感的重要研究内容之一^[1]。其中海流及其边缘锋的形态特征研究不仅具有重要的科学意义, 且面临着诸多实际应用的需求。海洋锋的时空变化对中心渔场、渔期、渔获量和渔业资源评估都有重要影响^[2]。然而从遥感反演要素场中提取海流及海洋锋的形态特征, 过去主要是采用灰度分割或假彩色显示, 结合人工目视分析, 提取和分析海洋现象特征^[3,4]。面对遥感数据海量增加、时间序列较长和判定标准需要统一的情况, 上述的方法在效率和定量上有所不足, 由此计算机自动进行海面形态特征的提取已具有必要性和迫切性。而海面形态特征具有动态易变性, 从要素场中自动提取一直是国内外研究难点^[5~11]。

20 世纪 60 年代发展起来的数学形态学基于集合论思想, 且易于实现并行算法, 在图像的边缘特征提取方面^[12~14], 比其它空域或频域方法更有明显优势。近年来, 国际上开始尝试运用数学形态学理论来提取海面形态特征, Krishnamurthy 等^[15]运用基于直方图的形态学边缘检测算子对北大西洋的中尺度冷涡和暖涡进行边缘提取; LeaMatthew 等运用形态学梯度的开闭运算算子对北大西洋湾流的红外遥感影像进行解译, 进而提取冷涡和暖涡的形态特征^[16]。但尚未有人对形态学梯度理论中的结构元素尺寸与海面形态特征的空间尺度之间的定量关系进行研究。基于此, 作者从数学形态学梯度基本理论出发, 进行理论关系推导, 从而实现海洋锋形态特征提取。

结构元素是形态学理论中至关重要概念, 结构元素尺寸与形状对梯度算子处理的结果有着决定性影响。从形态学梯度理论分析可知, 特定尺寸的结构元素对应于特定空间尺度下的要素特征, 即结构元素的尺寸过大或过小, 对某一空间尺度要素提取都达不到最佳效果。因此, 在运用形态学梯度进行海流及其边缘锋形态特征提取前, 有必要探索结构元素尺寸与海洋锋横断面宽度和海流流幅的空间尺度之间的最佳定量关系。

1 数据和方法

1.1 数据

作者将以黑潮(图 1)与墨西哥湾流(图 2)为实验对象探讨结构元素尺寸与海洋锋横断面宽度之间的定量关系。黑潮流域南北跨度约 16 个纬度, 东西跨度约 20 个经度。黑潮流幅的平均空间尺度约为 150 km, 在日本列岛南面海域, 黑潮流幅的最大空间尺度可达 200~300 km, 黑潮锋横断面的宽度约为 20~30 km^[9]。墨西哥湾流也称湾流, 湾流流幅的平均空间尺度约为 80~150 km, 湾流横断面的宽度也约为 20~30 km。

收稿日期: 2005-12-27; 修回日期: 2008-02-28

基金项目: 国家 863 计划资助项目(2002AA639400, 2003AA637030, 2003AA604040, 2004AA639820)

作者简介: 薛存金 (1979-), 男, 山东成武人, 博士研究生, 研究方向为海洋地理信息系统与海洋形态特征提取, E-mail: xuecj@lreis.ac.cn

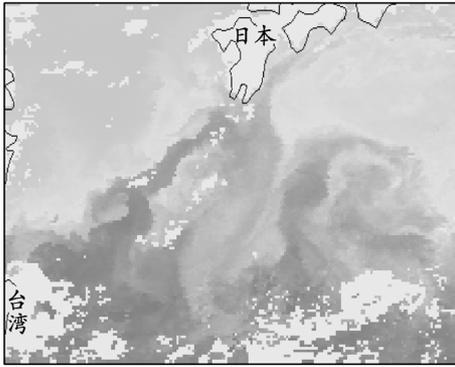


图1 黑潮流域遥感图像
Fig.1 The image of Kuroshio

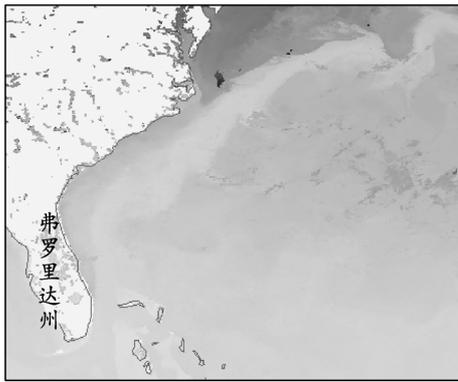


图2 湾流流域遥感图像
Fig.2 The image of Mexico gulf

选取的实验数据分别是 2002 年第 19 周的 NOAA 海洋 SST (Sea Surface Temperature) 栅格数据与 2003 年第 129 天至第 137 天的 MODIS/Aqua 海洋 SST 栅格数据。其中实验数据是由 NASA PO.DAAC(The Physical Oceanography Distributed Active Archive Center)提供的 AVHRR Pathfinder SST 资料。NOAA-SST 数据是从 1993~2002 年 10 年的数据中找出的视觉效果最为理想的黑潮锋, MODIS-SST 是从 2000~2004 年的数据中找出的视觉效果最为理想的湾流锋。NOAA-SST 数据的时间分辨率是 8 d, 空间分辨率是 9 km, 而 MODIS-SST 数据的时间分辨率是 Weekly, 空间分辨率是 4 km。算法采用 Visual C++6.0 从底层开发, 并集成在中国科学院地理科学与资源研究所·资源与环境信息系统国家重点实验室海洋研究组自主开发的海洋地理信息系统通用平台 MaXplorer1.0 上。

1.2 数学形态学梯度算子

形态学梯度通常定义为原始图像膨胀的结果减去原始图像腐蚀的结果^[12-17], 代数形式表示为:

$$\nabla f = (f \oplus g) - (f \ominus g) \quad (1)$$

从几何的角度分析, 信号 f 被结构元素 g 腐蚀的结果是在信号 f 的定义域内, 信号与结构元素差值的最小值集合; 信号 f 被结构元素 g 膨胀的结果是在信号 f 的定义域内, 信号与结构元素和的最大值集合。因此形态学梯度图像边缘特征信息清晰, 且连续性较好。由于采用扁平结构元素, 每一点的形态学梯度都可理解为结构元素内的极大值与极小值的差值。若形态学梯度算子以数字差分的形式给出, 则可简单的理解为单位距离内的最大差值, 公式表示为:

$$\nabla f = \frac{\Delta G}{\Delta D} \quad (2)$$

其中, ΔG 表示结构元素尺寸区域内图像的灰度最大值与最小值的差值; ΔD 表示计算梯度时定义的距离。

因此, 形态学梯度算子不仅可作为一个边缘检测算子来提取海洋锋形态特征, 且该算子在抗噪声的稳健型、连续性与对比度上都有一定的优势。

结构元素作为形态学梯度中的关键因子, 它的尺寸与形状对最终的梯度效果具有重要影响。从理论上分析, 不同尺寸的结构元素适合不同空间尺度的要素特征, 即结构元素的尺寸相对于特征要素的空间尺度过大或过小, 特征边缘的提取都达不到理想效果。结构元素的尺寸过大, 得到的边缘信息的定位精度较差; 结构元素的尺寸过小, 得到的边缘信息不仅定位精度较差, 且边缘信息的对比度也达不到理想效果。

由此, 下面探讨结构元素尺寸与海洋锋横断面宽度的关系和结构元素尺寸与海流流幅的空间尺度之间的最佳定量关系, 从而推导最佳的形态学梯度算子来进行海洋锋的形态特征提取。假设: (1) 海流流幅的空间尺度为 λ , 海洋锋横断面的宽度为 γ 和结构元素的尺寸为 δ ; (2) 结构元素为扁平结构元素; (3) 特征要素 f 为 1 维 2 值信号; (4) 取 $\lambda=5$, $\gamma=4$, $\delta=1, 2, 2.5, 3$ 为例说明。值得说明的是假设(4)中的具体数字不具有任何实际意义, 运用具体数字只是为了更好的从关系图中推导出 λ , γ 和 δ 之间最佳定量关系。结构元素尺寸与海洋锋横断面宽度的关系和结构元素尺寸与海流流幅的空间尺度之间的关系如图 3 所示。

从图 3 中, 可得出以下结论:

(1) δ 和 γ 的关系: 当 $\delta = \gamma/2$ 时, 所取得的边缘定位与图像的亮度效果最好; 当 $\delta < \gamma/2$ 时, 随着 δ 的减小, 所得边缘的中心宽度增加, 边缘定位精度降低, 边缘的中心亮度降低; $\delta > \gamma/2$ 时, 随着 δ 的增大, 所得边缘的中心宽度增加, 边缘定位精度降低, 边缘的中心亮度不变。

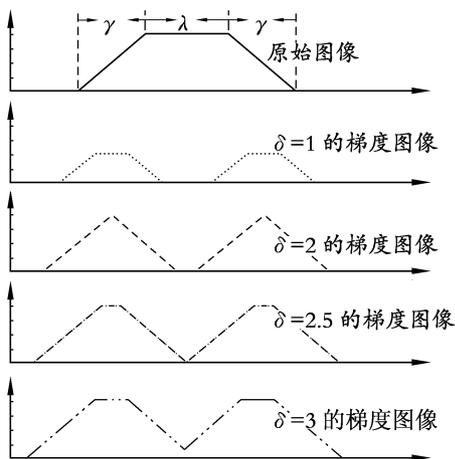


图3 结构元素尺寸与海洋锋流幅的空间尺度和海洋锋横断面的宽度的关系

Fig.3 The relationship between the structural elements sizes, spatial scales, and the transect width of ocean fronts

(2) δ 和 λ 的关系: 当 $\delta \leq \lambda/2$ 时, 能够取得较好的图像边缘信息, 随着 δ 的减小, 所得到的边缘定位信息越准确; 当 $\delta > \lambda/2$ 时, 随着 δ 的增大, 所得到的图像边缘定位信息愈不准确, 且当 $\delta = \lambda$ 时, 所得到的边缘图像是毫无意义的高亮度信号。

(3) 从(1)和(2)可知, λ , γ 和 δ 之间的最佳定量关系: $\delta = \gamma/2$, 且 $\delta \leq \lambda/2$ 。

尽管所采用的特征要素是1维2值信号, 对于2维数字图像该结论仍然成立。

2 结果

为了验证上述结论的正确性, 选取结构元素尺寸分别为 3×3 , 5×5 和 7×7 , 然后分别对黑潮流域的NOAA-SST影像与墨西哥湾流流域的MODIS-SST影像进行处理, 处理结果分别如图4a~4c与图5a~

5c所示。图中NOAA-SST数据的空间分辨率为 $9 \text{ km} \times 9 \text{ km}$, MODIS-SST影像数据的空间分辨率为 $4 \text{ km} \times 4 \text{ km}$ 。

从图4a~4c与图5a~5c中, 都可看出, 随着结构元素尺寸的增大, 所得到的图像边缘逐渐变粗, 定位精度也逐渐变得模糊。由于黑潮锋的横断面宽度与湾流锋的横断面宽度均约为 $20 \sim 30 \text{ km}$ 。当采用尺寸为 3×3 的结构元素时, δ 分别为 27 km ($3 \times 9 \text{ km}$)和 12 km ($3 \times 4 \text{ km}$), 此时的 δ 都大于 $\gamma/2$, 当结构元素的尺寸逐渐增大时, δ 也会更大, 因此, 无论从图4a~4c还是从图5a~5c中图像边缘逐渐变粗, 这与2.2中的结论(1)相符。

由图4a~4c可知, 图4a是较为理想的处理结果, 但在图4c中, 已很难找到有价值的边缘信息。这主要是因为对于NOAA-SST数据, 当结构元素的尺寸为 3×3 时, $\delta = 3 \times 9 \text{ km} = 27 \text{ km}$, 且黑潮锋的横断面宽度约为 $20 \sim 30 \text{ km}$, 流幅的空间尺度为 150 km , 即使是用最小尺寸的结构元素来提取海洋锋, 此时结构元素的尺寸 δ 已大于 $\gamma/2$, 但 $\delta < \lambda/2$, 因此, 用尺寸为 (3×3) 的结构元素来提取黑潮海洋锋的形态特征, 能取得较为理想的效果。由于图4c是采用结构元素尺寸为 7×7 梯度算子得到的边缘图像, 当结构元素的尺寸为 7×7 时, $\delta = 7 \times 9 \text{ km} = 63 \text{ km}$, 此时 δ 不仅大于 γ , 且 δ 与 $\lambda/2$ 的大小相差较小, 因此所得到的的是高亮度信息, 且只有在黑潮流幅的空间尺度较大的位置能找到黑潮锋的形态特征信息。

从图5a~5c中都能提取湾流锋的形态特征, 但从定位精度上分析, 图5a最精确, 湾流锋只有 $1 \sim 2$ 像素宽度, 因此, 图5a是最为理想的结果。主要原因在于MODIS-SST数据的空间分辨率为 $4 \text{ km} \times 4 \text{ km}$, 当采用结构元素的尺寸是 3×3 时, 则 $\delta = 3 \times 4 \text{ km} =$

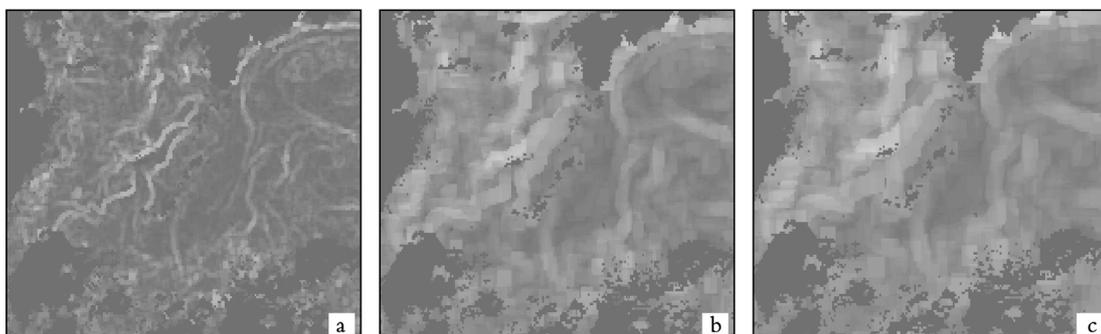


图4 用不同尺寸的结构元素检测到的黑潮梯度图像

Fig. 4 The gradient image of Kuroshio detected by different sizes of structure elements

a, b和c分别用的结构元素尺寸是 3×3 , 5×5 和 7×7 (图5同)

a, b and c' s structure elemental size respectively is 3×3 , 5×5 and 7×7 (the same as Fig.5)

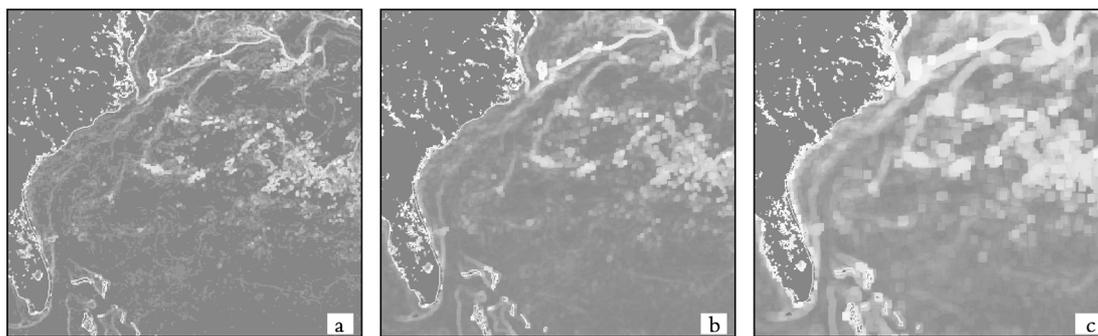


图 5 用不同尺寸的结构元素检测到的墨西哥湾流梯度图像

Fig. 5 The gradient image of Mexico gulf detected by different sizes of structure elements

12 km, 且湾流锋横断面宽度约为 20~30 km, 湾流流幅的空间尺度为 80~150 km, 此时 $\delta \approx \lambda/2$, 且 $\delta < \lambda/2$, 因此利用结构元素尺寸为 3×3 的梯度算子提取湾流锋形态特征能够取得最佳的效果; 当采用结构元素的尺寸是 7×7 时, $\delta = 7 \times 4 \text{ km} = 28 \text{ km}$, 尽管 $\delta > \lambda/2$, 甚至 $\delta > \lambda$, 但 $\delta < \lambda/2$, 因此利用 7×7 的梯度算子提取湾流锋的形态特征也能够取得理想的效果, 但此时的定位精度很低。

综合上述分析可知, 对空间分辨率为 9 km×9 km 的 NOAA-SST 遥感影像数据进行黑潮锋形态特征提取, 用结构元素尺寸为 3×3 的形态学梯度算子, 可取得较为理想的效果; 对空间分辨率为 4 km×4 km 的 MODIS-SST 遥感影像数据进行湾流锋形态特征提取, 用结构元素尺寸为 3×3 的形态学梯度算子, 可取得最为理想的效果。这为进行黑潮与湾流的时空演变研究与数据准备工作提供了借鉴意义。

3 结语

结构元素尺寸对形态学梯度算子具有重要影响, 不同尺寸的结构元素适合不同尺度的空间特征, 因此作者针对海洋要素锋的形态特征提取, 根据形态学梯度概念, 利用关系图分析方法, 得出最佳的结构元素尺寸与海洋锋横断面宽度和海流流幅的空间尺度的定量关系: $\delta = \lambda/2$, 且 $\delta \leq \lambda/2$ 。并以黑潮流域和湾流流域的 SST 数据作为实验数据, 对上述结论进行了验证, 并由此得出结论: 对空间分辨率为 9 km×9 km 的 NOAA-SST 遥感数据进行黑潮锋形态特征提取与对空间分辨率为 4 km×4 km 的 MODIS-SST 遥感数据进行湾流锋形态特征提取时, 采用结构元素尺寸为 3×3 的形态学梯度算子能达到理想的效果。尽管所采用的试验数据的空间分辨率稍大, 但该结论在实际的海洋锋形态特征自动提取方面具有较强的实用性, 与之相对应的算法也集成

到了自主开发的海洋地理信息系统通用平台 MaXplorer1.0 中。

致谢: 本文得到潘德炉院士的指正, 在此表示衷心感谢!

参考文献:

- [1] 毛志华,潘德炉,潘玉球. 利用卫星遥感 SST 估算海表流场[J]. 海洋通报,1996,15(1):84-90.
- [2] 李凤岐,苏育嵩.海洋水团分析[M].青岛:青岛海洋大学出版社,1999.35-36.
- [3] 国家海洋局科技司.黑潮调查研究综合报告[M].北京:海洋出版社,1995.
- [4] 郑义芳.东海北部海区黑潮锋的位置变动及其对陆架外缘附近海区水团分布的影响[A].国家海洋局科技司.黑潮调查研究论文选(二)[C].北京:海洋出版社,1990.22-27.
- [5] 严学强,刘济林,顾伟康.顺序形态学在图像边缘检测中的应用[J]. 信号处理,1997,13(4):357-362.
- [6] Wang D X, Liu Y, Qi Y Q, *et al.* Seasonal variability of thermal fronts in the northern south China Sea from satellite data[J]. *Geophysical Research Letters*,2001, 28(20):3 693-3 966.
- [7] Cho E C, Seetharaman G, Holyer R J, *et al.* Velocity Vectors for features of sequential oceanographic images [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1998,36(3):985-998.
- [8] Simhadri K K, Lyengar S S, Holyer R J, *et al.* Wavelet-based feature extraction from oceanographic images[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1998, 36(3):767-778.
- [9] Pechinpaugh S H, Holyer R J. Circle detection for extracting eddy size and position from satellite imagery of

- the ocean [J]. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, 1994, **32**(2): 267-273.
- [10] Shih F Y, Cheng S X. Adaptive mathematical morphology for edge linking [J]. **Information Science**, 2004, **167**(1-4):9-21.
- [11] Harvey N R, Marshall S. The use of genetic algorithms in morphological filter design [J]. **Signal Processing: Imaging Communication**, 1996, **8**(1):55-71.
- [12] 杨枝灵,王开. Visual C++数字图像获、处理与实践应用[M].北京:人民邮电出版社,2003.505-535.
- [13] 冯士筭,李凤岐,李少菁.海洋科学导论[M].北京:高等教育出版社,1999.167-173.
- [14] 崔屹. 图像处理与分析-数学形态学方法与应用[M].北京:科学出版社,2002.97-145.
- [15] Krishnamurthy S, Lyengar S S, Holyer R J, et al. Histogram-based morphological edge detector[J]. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, 1994, **32**(4):759-767.
- [16] LeaMatthew S M, Lybanon M. Finding mesoscale ocean structures with mathematical morphology [J]. **Remote Sensing of Environment**, 1993, **44**(1):25-33.
- [17] 冈萨雷斯.数字图像处理(第二版),阮秋琦等译[M].北京:电子工业出版社,2003.465-480.

Extracting feature of ocean front based on mathematical morphology

XUE Cun-jin^{1,2,3}, SU Fen-zhen¹, ZHOU Jun-qi², GUO Yan-you⁴,
ZHANG Tian-yu¹

(1. The Marine GIS' s Center of the State Key Lab of Resource and Environment Information System, Institute of Geographical Science and Natural Resources, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. School of Remote Sensing Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China; 3. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China; 4. Institute of Oceanology, the Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China)

Received: Dec., 30, 2005

Key words: ocean fronts; structural elements size; morphological gradient; feature extraction; marine geographical information system

Abstract: There have been some difficulties to auto-extract ocean fronts from remote sensing fields. And in morphological theory, different sizes of structure element are suitable for feature extraction of different scales. The optimal effect by too large or too small size of structure element can not be obtained. This work discusses the relationship between size of structure element δ , the width of ocean fronts γ and the width of ocean current λ . The theory analysis proves that the optimal quantitative relationship is $\delta = \gamma/2$ and $\delta \leq \lambda/2$. On the base of the relationship, the Kuroshio and the Gulf Stream are to be taken as experiment data for edge extraction based on morphological gradient, and it was shown that the quantitative relationship is correct and effective.

(本文编辑: 刘珊珊)