

Journal of Image
and Graphics

中国图象图形学报



ISSN1006-8961
CN11-3758/TB

2012 **11**
Vol.17 No.

中国科学院遥感应用研究所
中国图象图形学学会主办
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

Zhongguo Tuxiang Tuxing Xuebao

2012 年 11 月 第 17 卷 第 11 期(总第 199 期)

目 次

综述

数字图像合成技术综述 吴昊, 徐丹(1333)

图像处理和编码

基于群稀疏的结构化字典学习 郭景峰, 李贤(1347)

SSIM 度量虚拟视点绘制失真的深度图帧内编码 喻莉, 张军涛, 邓慧萍, 向森, 周鹏, 左雯, 王宁(1353)

统计量移位的鲁棒无损图像信息隐藏 李晓博, 周詮(1359)

伪造图像典型篡改操作的检测 左菊仙, 刘本永(1367)

图像分析和识别

融合灰度和 SURF 特征的红外目标跟踪 范新南, 丁朋华, 刘俊定, 张学武(1376)

海面温度栅格图的锋面提取与矢量化 崔雪森, 周为峰, 王栋, 张胜茂(1384)

交通场景中车辆的运动检测与阴影消除 王彬, 冯远静, 郭海峰, 张贵军(1391)

基于随机点积图的图像标注改善算法 孙登第, 罗斌, 郭玉堂(1400)

图像理解和计算机视觉

有监督子空间建模和稀疏表示的场景分类 段菲, 章毓晋(1409)

对立色 LBP 模型的目标跟踪 张炯, 宁纪锋, 颜永丰, 于伟(1418)

计算机图形学

联合骨架与边界特征的平面形状分解..... 蒋建国, 周丹凤, 郝世杰, 郭艳蓉, 詹曙(1425)

屏幕空间自适应的地形 Tessellation 绘制 张兵强, 张立民, 艾祖亮, 张建廷(1431)

遥感图像处理

SAR 图像稀疏优化滤波 杨萌, 张弓(1439)

分段线性动态矩匹配条带去除..... 秦雁, 邓孺孺, 何颖清, 陈蕾, 陈启东(1444)

基于 Harris 角点和 SIFT 描述符的高分辨率遥感影像匹配算法 陈梦婷, 闫冬梅, 王刚(1453)

第八届图像图形技术与应用学术会议征文通知 (1460)

中国图象图形学报

刊名题字: 宋 健 月刊(1996 年创刊) 第 17 卷 第 11 期 2012 年 11 月 16 日出版

主管单位	中国科学院	Superintended by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院遥感应用研究所 中国图象图形学学会 北京应用物理与计算数学研究所	Sponsored by	Institute of Remote Sensing Application, CAS China Society of Image and Graphics Institute of Applied Physics and Computational Mathematics
主 编	李小文	Chief editor	LI Xiaowen
编辑出版	《中国图象图形学报》编辑出版委员会 北京 9718 信箱 邮编 100101 电子信箱:jig@irsa.ac.cn 电话:010-64807995 010-82614429 网 址:www.cjig.cn	Editor, Publisher	Editorial and Publishing Board of Journal of Image and Graphics (P. O. Box 9718, Beijing 100101, China) E-mail:jig@irsa.ac.cn
印刷装订	北京北林印刷厂	Distributed by	Beijing Bureau for Distribution of Newspapers and Journals
广告经营许可证	京朝工商广字第 0346 号	Domestic	All Local Post Offices in China
总 发 行	北京报刊发行局	Foreign	China International Book Trading Corporation (P. O. Box 399, Beijing 100044, China)
订 购	全国各地邮局	Printed by	Beijing Beilin Printing House
国外发行	中国国际图书贸易总公司 (中国国际书店) (北京 399 信箱 邮编 100044)		

ISSN 1006-8961 CN11-3758/TB CODE ZTTFXZ 国内邮发代号: 82-831 国外发行代号: M1406 国内定价: 45.00 元

中图法分类号: TP391.41 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2012)11-1384-07

论文引用格式: 崔雪森, 周为峰, 王栋, 张胜茂. 海面温度栅格图的锋面提取与矢量化[J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(11): 1384-1390.

海面温度栅格图的锋面提取与矢量化

崔雪森, 周为峰, 王栋, 张胜茂

中国水产科学研究院东海水产研究所渔业资源遥感信息技术重点开放实验室, 上海 200090

摘要: 提出一种海面温度栅格图的锋面提取方法。针对海洋表层温度(SST)锋面强度分布不均匀的特点, 利用低通滤波对表温梯度图像进行平滑。再利用迭代法确定出梯度图像的分割阈值, 将图像分割成目标与背景两部分。通过数学形态学中图像细化的方法, 提取海洋温度锋面的骨架并对细小分枝进行修剪。经矢量化生成锋面线后, 利用抹角法对折线进行光滑。最后以西太平洋为例, 给出了一个表温锋面提取的实例, 表明利用此方法进行海表温度锋面的提取是可行与有效的。

关键词: 海表温度; 数学形态学; 锋面提取; 矢量化

Fronts extraction and vectorization from raster image of sea surface temperature

Cui Xuesen, Zhou Weifeng, Wang Dong, Zhang Shengmao

Key & Open Laboratory of Remote Sensing & Information Technology Application in Fisheries,
East China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200090, China

Abstract: A front extraction method for a raster image of sea surface temperature (SST) is presented. Considering that the front was distributed unevenly, a low-pass filter is used to smooth the SST gradient image. The gradient image is then divided into target and background parts by a split threshold calculated from the iteration algorithm. By mathematical morphology image thinning, a SST front skeleton is extracted from the target one, and the tiny branches are trimmed. After the vectorization of the SST front skeleton, the vectorized SST front lines are smoothed using the erasing angle method. An example of SST front extracting process in the west Pacific is presented at last. The results show that the method is feasible and effective.

Key words: sea surface temperature; mathematical morphology; front extraction; vectorization

0 引言

温度锋面的形成是海洋中各种物理过程作用的结果, 不仅影响到海洋的热量交换、流场结构、污染物的分布, 对海洋生物栖息地的变动以及渔业捕捞生产也有重要作用^[1-5]。对于海洋温度锋面的检测, 海内外已有许多研究。Shimada 等人^[6]通过计算 Jensen-Shannon 散度, 基于熵逼近的方法对海洋表

层温度(SST)锋面检测进行了研究。Shaw 等人^[7]通过超越正切函数对锋面进行跟踪, 计算出了新西兰南岛海域温度锋面的位置, 同时还有锋面所在处的水温、宽度以及不同水团之间的水温差。在此工作基础上, Hopkins 等人^[8]用加权局部似然性方法对上述海域的锋面进行了提取。邵全琴等人^[9]提出了基于等温线内插的计算渔区温度梯度的新算法。该方法解决了用现有 GIS (geographic information system) 计算渔区温度水平梯度中存在

收稿日期: 2011-12-01; 修回日期: 2012-05-10

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863) 基金项目(2007AA092202)

第一作者简介: 崔雪森(1973—), 男, 副研究员, 1997 年于厦门大学获海洋生物专业学士学位, 主要从事渔业遥感应用方面的研究。

E-mail: cuixuesen@eastfishery.ac.cn

的实际距离问题、渔区格网不规则问题和渔区格点问题。

在大多数锋面提取方法中,普遍存在以下两个问题:1)极值变更(extremum alteration)现象^[10],即局部尖锐峰值的产生,从而使梯度强度值分布跨度过大,使用统一的阈值只能提取出一定强度的锋面或一条锋面的较强部分,而强度在此阈值以下的弱锋面就被剔除了。虽然此问题可通过先将整个海域分割后局部逐步提取再拼接的方法解决,但此过程当中无疑增加了人工干预,不仅致使提取结果受人为因素的影响较大,且不利于提取的自动化处理。2)矢量化,上述方法均以栅格形式得到锋面位置,各条锋面都以由离散点构成的条带形式存在,这对于其整体位置变化的量化分析是不利的。

本研究在求得海表温度梯度强度值后,对其进行了规范化处理。在此基础上,利用统一的阈值对图像进行分割,从而解决出现极值变更的问题。再利用数学形态学的方法,对海表温度锋面进行了细化和提取,最后对所得的锋面线进行了修剪和矢量化,并与未经进行规范化处理所得的结果进行了比较。

1 数据处理方法

1.1 海表温度梯度的计算与规范化处理

海洋表层温度梯度可以通过梯度幅值(GM)的公式获得^[11]。设当前点为 $t_{i,j}$,选取上下左右4个网格点的温度值分别为 $t_{i\pm1,j}$ 和 $t_{i,j\pm1}$,以差分的格式表示表温梯度为

$$G(i,j) =$$

$$\sqrt{[(t_{i+1,j} - t_{i-1,j})/\Delta y]^2 + [(t_{i,j+1} - t_{i,j-1})/\Delta x]^2}$$

式中, i,j 为整数,表示栅格数据的行列号; $G(i,j)$ 表示第 i 行、第 j 列所在点的梯度强度,单位为 $^{\circ}\text{C}/\text{km}$; Δy 表示第 $i-1$ 行与第 $i+1$ 行点之间的纵向距离, Δx 表示第 $j-1$ 列与第 $j+1$ 列点间的横向距离,单位均为 km 。

为了便于通过单一阈值对不同强度的锋面进行初步提取,须将所研究海域的梯度强度进行规范化处理,即经过低通滤波,对图像进行平滑。在此选用

高斯模板 $\begin{bmatrix} 1/16 & 1/8 & 1/16 \\ 1/8 & 1/4 & 1/8 \\ 1/16 & 1/8 & 1/16 \end{bmatrix}$ 对梯度图像 G 进行卷

积运算得到一个平滑的梯度面 $\bar{G}$ 。再令 $G' = G/\bar{G}$,得到规范化后的梯度图像。规范化后的 G' 没有量纲。

1.2 图像分割

在进行图像分割之前,首先要确定分割阈值,即将规范化后的梯度图像分为目标与背景两部分。在此,利用迭代法^[12-13],通过程序自动确定合适的分割阈值。若图像 G' 中最小值和最大值分别为 $G_{\min}$ 和 $G_{\max}$,则

1) 令初始阈值 $T_k = (G_{\min} + G_{\max})/2$;

2) 根据阈值 T_k 将图像分割为目标和背景两部分,求出两者的梯度平均值分别为 Z_o 和 Z_b ;

3) 求出新阈值 $T_{k+1} = (Z_o + Z_b)/2$;

4) 若 $T_k = T_{k+1}$,则所得 T_k 为最终阈值,退出迭代;否则转步骤2),继续进行迭代计算。

在实际运用中,为了避免可能出现的无限循环,可设定一个最大的循环次数。只要达到了这个最大的循环次数,就直接用当前的阈值 T_k 作为最后的阈值,退出循环,以避免 T_k 的无限振荡^[14]。

利用此方法得到的阈值 T_k 将图像进行二值化(小于阈值的点记为0,大于或等于阈值的点标为1)处理,从而得到锋面骨架的粗略图。

使用同样方法,得到原始梯度图像的分割阈值 T_g ,以备骨架修剪以及提取效果比较时使用。

1.3 图像的细化

1.2节处理得到的锋面粗略图还需经过进一步的细化处理。图像的细化又称骨架化,是数学形态学中腐蚀运算的一种重要变体,是为保持原有图像的连通性而作的一种改进算法^[15]。

这里采用Zhang-Suen^[16]方法。假设在二值图像 P 中,当前点为 p_1 ,则其八方向邻域的点可表示为

p_9	p_2	p_3
p_8	p_1	p_4
p_7	p_6	p_5

如果 p_1 的值为1,且同时满足以下4个条件:

1) $2 \leq B(p_1) \leq 6$;

2) $A(p_1) = 1$;

3) p_2, p_4, p_6 中至少有一个值为0;

4) p_4, p_6, p_8 中至少有一个值为0

或

5) p_2, p_6, p_8 中至少有一个值为0;

6) p_2, p_4, p_8 中至少有一个值为 0。

则可将 p_1 的值设为 0 (或称可删除该点)。其中, $B(p_1)$ 表示 p_1 周围值为 1 的像素数, $A(p_1)$ 表示 p_1 周围 $p_2 \sim p_9$ 的值按次序排列时, 相邻的 0 和 1 出现的次数。步骤 3) 4) 和步骤 5) 6) 在循环中轮换执行。

遍历图像, 删除图像中符合上述 4 个条件的点。重复遍历图像, 直至没有可以删除的点, 则完成细化过程。

1.4 表温锋面的后期处理

1.4.1 骨架的修剪

经细化后的图像, 会产生少量短线以及长线上的短分枝, 应进行修剪处理。但是为了避免较强的涡被误剔除, 首先计算其所在位置的锋面强度, 并将其与 1.2 节中得到的原始梯度图像的阈值 T_g 进行比较。如果大于 T_g , 则保留这个分枝。如果小于 T_g , 则分以下两处情况予以处理:

1) 对于短线, 通过标记连通域的方法进行处理。即当某个连通域中的像素数小于 n (n 为大于 1 的整数) 时, 将此连通域中的这些点全部置 0。

2) 对于长线上的细小分枝 (在本研究中, 将细小分枝长度定为 1), 采取以下方法处理: 设当前点为 p , 如果 $A(p) = 1$ 且在其八方向上存在一个 p'_i , ($i = 1, 2, \dots, 8$), 使 $A(p'_i) \geq 3$, 则可以判定当前点 p 为细小分枝, 直接设为 0 将其删除。如图 1 所示为修剪处理的示意图。

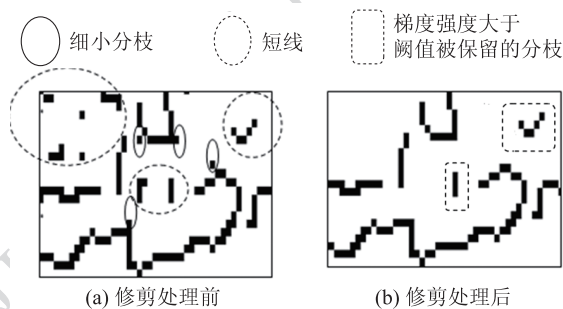


图 1 SST 锋面骨架的修剪

Fig. 1 The Trim the of SST front skeleton

1.4.2 矢量化

经细化并修剪后的栅格化锋面 (或称锋面连通域) 可以反映海表温度锋面的位置与长度。实际应用当中, 在放大倍数不大的情况下, 已经能够满足需要。但在将其插入到电子地图中与矢量格式的文件同时进行任意放大处理时, 其锯齿化程度会随着放

大倍数的增加而越趋严重, 大大影响了地图显示的一致性与可读性, 所以有必要将其转化成矢量格式的图像。

矢量化时, 首先将栅格形式的锋面 (或称锋面连通域) 分为两类:

1) 有端点型, 若锋面连通域 D 中存在一点 p , 满足条件 $A(p) = 1$, 则 D 为有端点类型的锋面。

2) 闭合型, 对于锋面连通域 D 中任意点 p 都满足 $A(p) \neq 1$, 则 D 为闭合型的锋面。

矢量化锋面分为两个过程:

1) 搜索有端点类型的的锋面连通域。遍历图像中所有点, 找到未标记的端点 p , 如果满足 $A(p) = 1$, 则作标记并记录。在八方向上查找与其相邻点, 标记并记录。循环这一过程, 直至遇到一个端点或有标记的点。连接所有记录的点。重复这一过程, 得到多组的锋面线。

2) 在完成有端点类型的锋面连通域的搜索后, 剩余的连通域均为闭合型。同样是遍历图像, 找到未标记的点, 作标记并记录。在八方向上查找与其相邻点, 标记并记录。循环此过程, 直至遇到一个有标记的点, 连接所有记录的点。同样重复这一过程, 生成多组的锋面线。

最后将两部分的锋面线组合并。

1.4.3 平滑与简化

如图 2(a) 所示, 生成的锋面线多为不平滑的折线。其特点为拐角处的角度只有 180° 、 145° 与 90° 这 3 种, 也就是说折线所有拐角均较大, 又因为网格采样数据比较密集, 所以采用抹角法对其进行平滑^[17-19]。为了在平滑后不使控制点数量成倍增加, 取各个线段的中点作为抹角的位置。图 2(b) 为经过一次抹角的曲线。这个抹角的过程可以迭代进行, 最终生成一条平滑的曲线。在这条曲线当中, 部分拐角的角度等于或接近 180° , 则这个拐角的点将作为多余的控制点去除, 从而使曲线得到简化。如图 2(c) 所示。

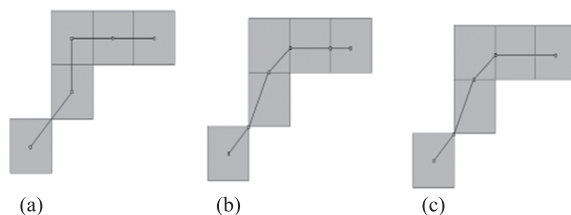


图 2 锋面折线的平滑与简化

Fig. 2 The smoothing and simplifying of front broken lines

2 实例分析

本文方法的实验环境为 Windows XP 操作系统,开发环境为 Visual C++ 6.0。为了验证锋面提取方法的可行性,选取东海以及西太平洋海域的表温进行锋面提取实验。数据来自 MODIS 三级产品的周平均海表温度数据,时间为 2010 年 10 月 8—15 日,空间分辨率 9 km,跨度为 110°~180°E、24°~45°N。为了减少处理时间,将其抽取成空间分辨率为 0.25°的格

点数据。之所以选取该海域,是因为此区域北部和西部为黑潮、黑潮续流与亲潮的交汇区,表温变化剧烈,而在远离黑潮与亲潮的海域,温度变化较缓和^[20-21],便于检验本文方法对表温锋面的提取效果。

图 3 为表层温度(SST)图,采用上节所述方法,计算得到其表温梯度图(如图 4),再由此得出规范化的无量纲梯度数据(如图 5)。然后进行图像的阈值计算,得到实际阈值 $T_k = 0.995$ 。据此阈值进行图像分割,得到骨架的粗略图(图 6)后。依据 Zhang-Suen 的算法细化图像,得到其骨架,即栅格形式的锋面。

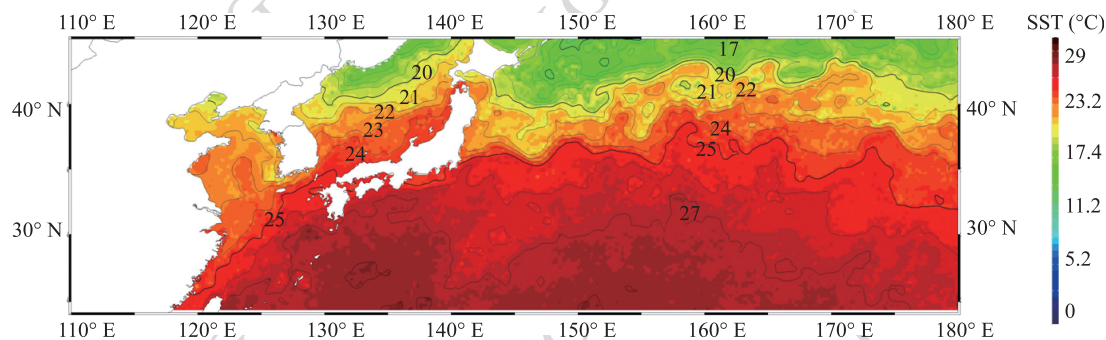


图 3 2010 年 10 月 8—15 日东海以及西太平洋 SST 图

Fig. 3 The SST image in East China Sea and West Pacific between 8th and 15th in October, 2010

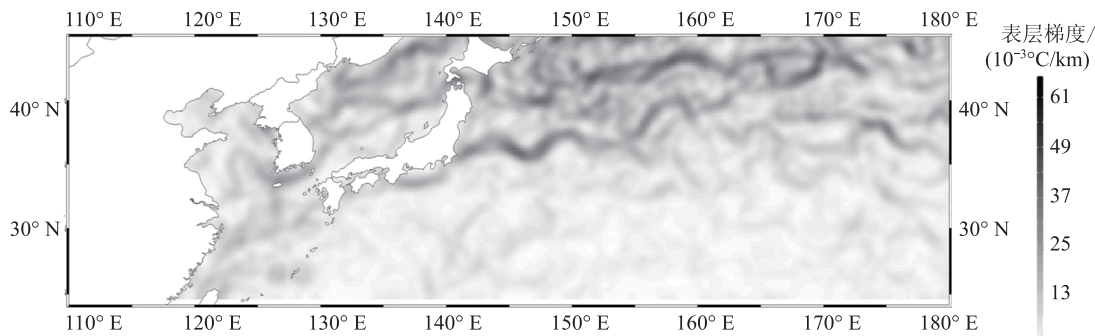


图 4 SST 梯度图像

Fig. 4 The SST gradient image

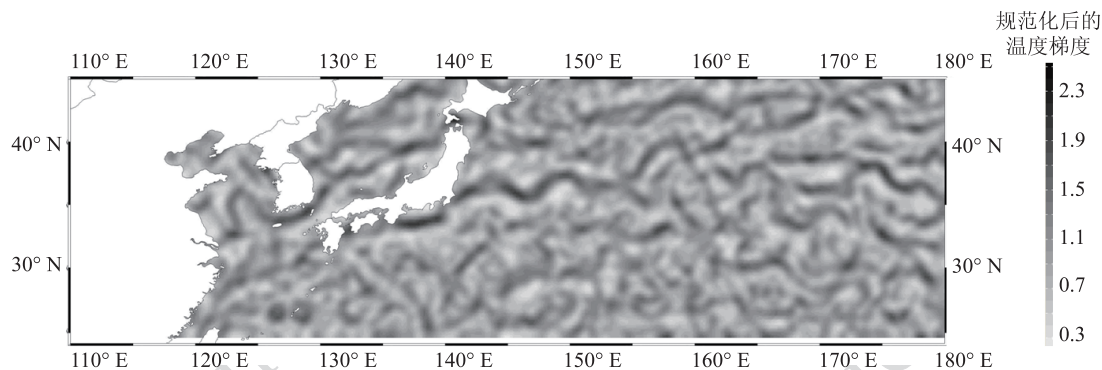


图 5 规范化后无量纲的 SST 梯度图像

Fig. 5 The dimensionless SST gradient image after normalization

在此基础上,对栅格锋面进行矢量化,并进行平滑处理,最终得到矢量形式的 SST 锋面。又依据原始温度梯度数据,将梯度强度信息叠加在各条锋面线上。如图 7(b)所示。

图 7(a)给出了未经规范化处理提取的温度锋面图,图像分割阈值 $T_g = 0.0129\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 。很明显,其锋面的提取效果较好的区域只局限于西部及北部出现黑潮和亲潮的温度变化较强处,而在梯度强度

较弱的南部海域提取的锋面是不完整的。在亲潮区,锋面与背景温度梯度的位置出现了明显偏离,南部海域几乎未提取到锋面线,东海与日本海只提取到部分温度锋面。

图 7(b)所显示的是经规范化处理后的情况,整个海域都提取到了相对较为完整的锋面,且各条线与背景中的实际梯度分布也更加吻合,与等温线的分布也较为一致。

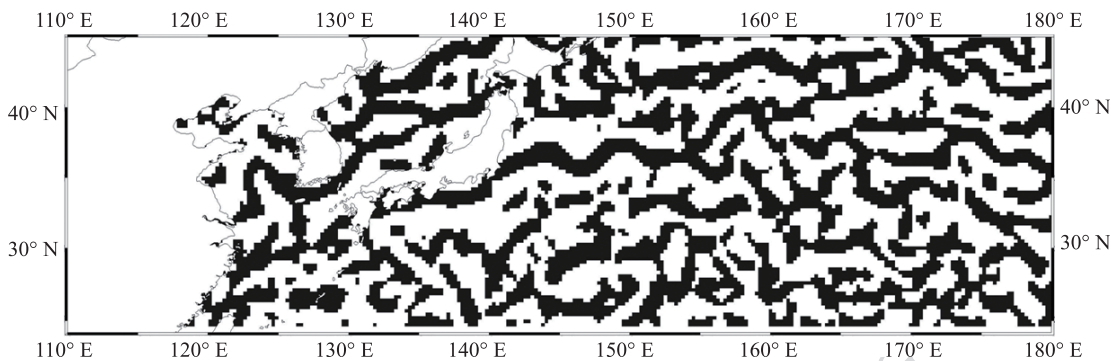
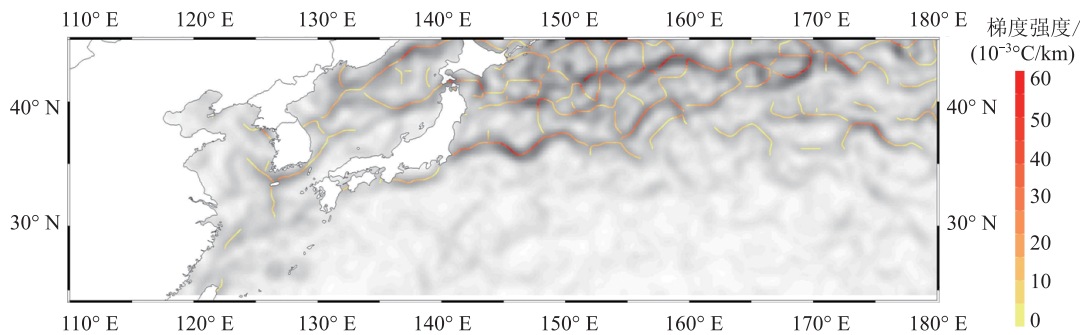
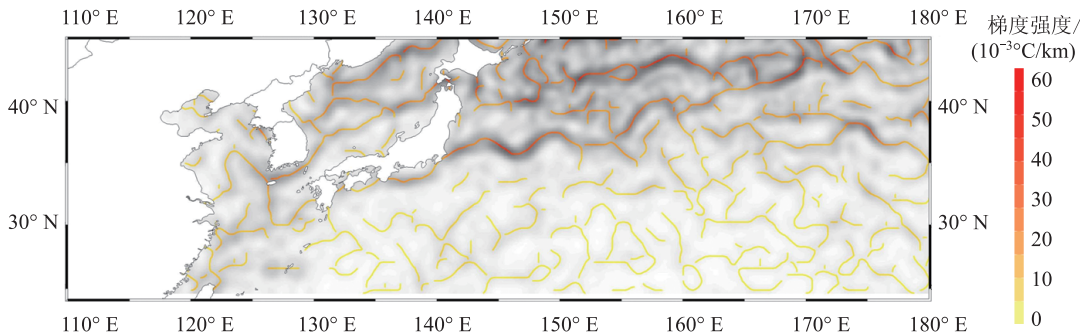


图 6 SST 梯度图像分割后的结果 ($T_k = 0.995$)

Fig. 6 The image of SST gradient after segmentation ($T_k = 0.995$)



(a) 未经规范化处理的提取结果



(b) 经规范化处理的提取结果

图 7 提取的 SST 锋线与实际温度梯度图吻合情况图

Fig. 7 Match degree charts of extracted SST frontal lines and the actual SST gradient image

3 结 论

传统上的 SST 锋面提取,多侧重于保留强度较强的锋面,或一条锋面的较强部分,而忽略了较弱的部分。但由于大多数海域的温度分布随季节的变化而不同,其锋面强度也会随之有强弱的大幅度变化。过去的大部分研究都是通过经验梯度强度阈值来确定锋面的,从而容易得出在某个季节海表温度锋面消失的结论^[22-23]。在这种情况下,有些学者借助海表温度之外的其他海洋要素(如叶绿素 a 浓度)来确定锋面位置^[24]。这种变通虽然解决了提取不到锋面的问题,但由于所使用的数据种类的不同,从而使得到的海洋锋面在时间序列上有所差异,降低了海洋锋面演化的连续性和可比性。

本文采取对表温梯度先规范化处理的方法,从而使不同强弱程度的锋面即使在整体强度较弱的情况下都得到了保留。然后用计算出的阈值一次性对图像进行分割,再通过细化提取骨架并矢量化,同时保留了锋面所在位置的强度信息。这种方法减少了分块提取时的人为不确定因素,提高了自动化提取的程度。从提取效果上看,此方法使不同强度的锋面同时得到表现,增加了锋面的连贯性与可读性。

参考文献(References)

- [1] Schneider D. Fronts and seabird aggregations in the southeast Bering Sea[J]. Marine Ecology Progress Series,1982,10:101-103.
- [2] Chen X J, Liu B L, Tian S Q, et al. Forecasting the fishing ground of *Ommastrephes bartramii* with SST-based habitat suitability modeling in northwestern Pacific[J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica,2006,40(6):701-703. [陈新军,刘必林,田思泉,等. 利用基于表温因子的栖息地模型预测西北太平洋柔鱼(*Ommastrephes bartramii*)渔场[J]. 海洋与湖沼,2006,40(6):701-703.]
- [3] Zhang X M, Shang S P, Zhang C Y, et al. Potential influence of sea surface temperature on the interannual fluctuation of the catch and the distribution of chub mackerel and round scad in the Minnan-Taiwan bank fishing ground, China[J]. Marine Science Bulletin,2005,24(4):92-96. [张学敏,商少平,张彩云,等. 闽南—台湾浅滩渔场海表温度对鲈鲷鱼类群聚资源年际变动的影响初探[J]. 海洋通报,2005,24(4):92-96.]
- [4] Herron R C, Leming T D, Li J L. Satellite-detected fronts and butterfish aggregations in the northeastern gulf of Mexico[J]. Continental Shelf Research, 1989, 9(6): 569-588.
- [5] Russell R W, Harrison N M, Hunt G L. Foraging at a front: hydrography, zooplankton, and avian planktivory in the northern Bering Sea[J]. Marine Ecology Progress Series,1999, 182: 77-93.
- [6] Shimada T, Sakaida F, Kawamura H, et al. Application of an edge detection method to satellite images for distinguishing sea surface temperature fronts near the Japanese coast[J]. Remote Sensing of Environment, 2005,98(1): 21-34.
- [7] Shaw A G P, Vennell R. Measurements of an oceanic front using a front-following algorithm for AVHRR SST imagery[J]. Remote Sensing of Environment, 2001,75(1):47-62.
- [8] Hopkins J, Challenor P, Shaw A G P. A new statistical modeling approach to ocean front detection from SST satellite images[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology,2010,27(1): 173-191.
- [9] Shao Q Q, Rong K, You Z M, et al. Error analysis and a new algorithm to calculate horizontal temperature gradient in marine fishery GIS[J]. Journal of Remote Sensing,2005,9(2):148-157. [邵全琴,戎恺,游智敏,等. 海洋渔业中温度水平梯度计算的误差分析和新算法研究[J]. 遥感学报,2005,9(2):148-157.]
- [10] Igor M B, John E O. An algorithm for oceanic front detection in chlorophyll and SST satellite imagery[J]. Journal of Marine System, 2009,78(3): 317-326.
- [11] Pi Q L, Hu J Y. Analysis of sea surface temperature fronts in the Taiwan Strait and its adjacent area using an advanced edge detection method[J]. Science China Earth Science,2010,53(7): 1008-1016.
- [12] Ridler T, Calvard S. Picture thresholding using an iterative selection method[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics,1978,8(8):630-632.
- [13] He B, Ma T Y, Wang Y J, et al. Visual C++ Digital Image Processing[M]. Beijing: Posts & Telecom Press. 2001:459-471. [何斌,马天予,王运坚,等. Visual C++ 数字图像处理[M]. 北京:人民邮电出版社,2001:459-471.]
- [14] Xie X Z, Lv L G, Zhang S. Extracting background-images and gaining value in video frequency monitor system of ammunition depot[J]. Journal of System Simulation,2006,18(z2): 224-226. [谢晓竹,吕丽刚,张申. 基于弹药库视频监控的背景提取及阈值获取[J]. 系统仿真学报,2006,18(z2): 224-226.]
- [15] Lang R. Digital Image Processing Science[M]. Beijing: Hope Electronic Press,2003:349-350. [郎锐. 数字图像处理学[M]. 北京:希望电子出版社,2003:349-350.]
- [16] Zhang T Y, Suen C Y. A fast parallel algorithm for thinning digital patterns[J]. Communications of the ACM,1984,27(3): 236-239.
- [17] Yang D L. The Method and Application on Large-scaled Mapping Digital Mapping[M]. Beijing: Tsinghua University Press,1998: 152. [杨德麟,大比例尺数字测图的原理方法与应用[M]. 北京:清华大学出版社,1998:152.]
- [18] Wang Y L, Wang M S. The method of the new-type line smoothing—the tangent erased cape method[J]. Bulletin of Surveying

- Mapping, 2005(3):52-54. [王延亮, 王明爽. 新型曲线光滑法——切线抹角[J]. 测绘通报, 2005(3):52-54.]
- [19] Zhu J P. Comparison of contour generation between automatic drawing and hand-drawing[J]. Pearl River Modern Construction, 2000(5):22-24. [朱建平. 等高线自动绘制及其与人工勾绘等高线的比较[J]. 珠江现代建设, 2000(5):22-24.]
- [20] Kartushinsky A V. Time-space structure and variability of surface temperature frontal zones in the ocean (based on AVHRR satellite data)[J]. Advances in Space Research, 2000, 25(5): 1107-1110.
- [21] Shen X Q, Fan W, Cui X S. Study on the relationship of fishing ground distribution of *Ommastrephes bartrami* and water temperature in the northwest Pacific Ocean[J]. Marine Fisheries Research, 2004, 25(3):10-14. [沈新强, 樊伟, 崔雪森. 西北太平洋柔鱼渔场分布与水温关系的研究[J]. 海洋水产研究, 2004, 25(3):10-14.]
- [22] Ullman D S, Cornillon P C. Satellite-derived sea surface temperature fronts on the continental shelf off the northeast U. S. coast [J]. Journal of Geophysical Research, 1999, 104(10): 23459-23478.
- [23] Hickox R, Belkin I, Cornillon P, et al. Climatology and seasonal variability of ocean fronts in the East China, Yellow and Bohai seas from satellite SST data[J]. Geophys. Res. Lett., 2000, 27(18): 2945-2948.
- [24] Legeckis R, Brown C W, Chang P S. Geostationary satellites reveal motions of ocean surface fronts [J]. Journal of Marine Systems, 2002, 37(1-3):3-15.