

不同滤波方法对揭示全球海洋条带结构的比较

张宇 管玉平 陈朝晖 刘海龙 黄瑞新

Intercomparison of one-dimensional detecting methods of unveiling the global ocean striations

Zhang Yu Guan Yu-Ping Chen Zhao-Hui Liu Hai-Long Huang Rui-Xin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 149201 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.149201

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.149201>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I14>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

海洋表面波的3-4-5波共振守恒理论

[A theory of 3-4-5-wave resonance and conservation for ocean surface waves](#)

物理学报.2013, 62(13): 139201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.139201>

半干旱草原下垫面动量和感热总体输送系数参数化关系研究

[Bulk transfer coefficients of momentum and sensible heat over semiarid grassland surface and their parameterization scheme](#)

物理学报.2013, 62(9): 099202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.099202>

梯度计算的集合变分方案及其在大气Ekman层湍流系数反演中的应用

[Gradient calculation based ensemble variational method and its application to the inversion of the turbulent coefficient in atmospheric Ekman layer](#)

物理学报.2013, 62(4): 049201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.049201>

草原下垫面湍流动量和感热相似性函数及总体输送系数的特征

[The characteristics of turbulent momentum and heat similarity function and bulk transfer coefficient over grassland surface](#)

物理学报.2012, 61(21): 219201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.219201>

不同滤波方法对揭示全球海洋条带结构的比较*

张宇¹⁾²⁾ 管玉平^{2)†} 陈朝晖³⁾ 刘海龙⁴⁾ 黄瑞新⁵⁾

1) (浙江海洋学院, 海洋科学与技术学院, 舟山 316000)

2) (中国科学院南海海洋研究所, 热带海洋环境国家重点实验室, 广州 510301)

3) (中国海洋大学, 物理海洋教育部重点实验室, 青岛 266003)

4) (中国科学院大气物理研究所, 大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029)

5) (Woods Hole Oceanographic Institution, Woods Hole, MA02543, USA)

(2014年9月22日收到; 2015年2月23日收到修改稿)

海洋条带结构是近年物理海洋学研究的一个新热点. 在海洋中, 条带结构往往被大尺度环流过程所掩盖. 把这种隐蔽的海水运动现象显现出来的办法是对时间平均的速度场进行空间滤波. 利用全球简单海洋资料同化分析系统资料和中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室的气候系统海洋模式模拟数据对三种一维滤波方法进行了比较, 分别是常用的高斯和汉宁滤波方法, 以及本文引入的切比雪夫滤波方法. 结果表明, 尽管三种方法均可获得条带结构, 但以切比雪夫方法为最佳; 另外, 设计高通滤波器时需设定截断频率, 而它的选定取决于对具体数据的频谱分析, 当选取的归一化的截断频率值在0.1和0.4之间时, 可以有效地揭示出条带结构在全球海域内的分布. 因此本文的研究方法为海洋条带结构的深入研究提供了一个有力工具.

关键词: 湍流, 条带结构, 带状流, 高通滤波**PACS:** 92.10.Lq, 92.10.ah, 92.05.-x, 92.10.ak**DOI:** 10.7498/aps.64.149201

1 引言

湍流是至今仍未解决的世纪难题, 这种复杂得令人敬畏的无序运动一直激励着科学家们寻求其内在的规律性. 湍流在某种程度上会呈现一定的有序性, 其中之一就是条带结构. 这种结构广泛存在于自然界中, 如天体物理中土星和木星的行星环^[1,2]、等离子物理中的带状流^[3-6]. 本文涉及的是地球物理中的海洋条带(striation), 这样的运动结构对海洋混合具有抑制作用, 进而影响海洋自身的运动, 另一方面它又可作为海洋物质能量运输的通道对全球气候变化产生影响, 因而成为物理海洋学研究的热点之一^[7]. 海洋条带现象通常是指东向纬向流与西向纬向流在经向上交替分布的特征,

有文章称其为纬向射流(zonal jets). 与行星环不同的是, 海洋中的条带结构在原始的流场中往往无法呈现出来, 这是由于大洋中存在着如洋盆尺度的环流、厄尔尼诺现象、太平洋年代际振荡和印度洋偶极子等显著的大尺度过程. 在海洋数据资料中, 无论是实测数据还是模式数据, 这些大尺度过程都占据着主导地位. 在简单时空平均数据中, 大尺度的海洋环流掩盖了中尺度的条带结构^[8,9]. 为了将这种与大尺度过程共存的隐蔽现象显现出来, 我们需要对原始的数据信号进行滤波^[8-20]. 通常情况下, 在分析海水温度、盐度等的年际变化和季节性变化时, 对数据的处理往往是在时间上进行滤波. 而本文所采用的滤波是指在空间上的滤波, 主要是为了揭示某些物理量随着空间变化的特征, 而非时间上的特征. 滤波作为海洋资料分析与处理中的

* 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2013CB956201, 2013CB956204)和国家自然科学基金(批准号: 91228202, 40976011)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: guan@scsio.ac.cn

常用手段,其滤波器的设计方法也有多种多样.例如,可以通过简单的高斯平滑对水平速度场在空间上进行加权平均,滤去异常的信号^[10,11];也可以采用汉宁(Hanning)高通滤波器过滤大尺度环流过程等^[8-12].

尽管通过多种方法可以得到海洋条带结构,但不同的方法得到的结果仍有一定差异. Maximenko 等^[8,12]在太平洋中低纬度的东部沿岸区域得到了较明显的条带,并根据莱茵(Rhines)理论算出纬向射流的经向波长(即带宽)约为300 km;而 Buckingham 和 Cornillon^[13]则对南太平洋中纬度的中部区域条带产生的机理进行研究,所得波长为300—500 km; Kamenkovich 等^[15]所利用的模式数据表明在北大西洋有明显的纬向射流,他们通过观察波峰之间的距离,确定条带结构的带宽约为 1.6° — 2.0° ,即160—200 km”.

以往的研究主要揭示了在不同海域的条带现象,其中大多关注中纬度海域的纬向射流.那么,这样的条带结构是仅呈现于某些海域的局部特征,还是全球大洋普遍存在的现象?

另外,过去有些研究甚至没有明确指出其所采用的滤波方法,显然,不同研究者所采用的滤波方法各有不同.那么,滤波方法是否对分析结论有影响?

为回答以上问题,本文从一维滤波的角度入手,分析对比不同一维滤波方法之间所得条带结构的差异,进一步探讨全球海洋条带结构的特征.

2 资料与方法

本文使用的资料是全球简单海洋资料同化分析系统(SODA)和LICOM两套数据. SODA数据为2.2.4版(来自<http://www.atmos.umd.edu/~ocean/>),选取了2001—2010十年,其分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$; LICOM数据是LASG/IAP气候系统海洋模式(LASG/IAP Climate System Ocean Model)模拟结果,此模式是由中国科学院大气物理研究所(IAP)大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室(LASG)自主开发;所用的数据长度从2000—2007年,模式强迫场采用了逐日的QuikSCAT(CERSAT-IFREMER)的海表风应力资料和COREs(Coordinated Ocean-ice Reference Experiments, Large and Yeager 2004)的海表大气状态变量(气温、比湿、风场、降水、气压)、辐射变量(向下短波辐射和向下长波辐射)为强迫. 积分初值

采用了气候强迫12年spinup的结果. 模式详细信息请参见文献^[21, 22]. 因为在滤波前需要对数据进行时间平均,所以LICOM的八年数据并不会对分析结论产生影响. LICOM模式数据的分辨率是 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$,为了与SODA数据进行对比,在进一步分析之前将其转化为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$.

三种滤波方法简介如下.

1) 高斯(Gauss)平滑

高斯核函数:

$$k(|x - xc|) = e^{-\frac{(|x-xc|)^2}{2\sigma^2}}, \quad (1)$$

其中 xc 为核函数中心, σ 为函数的宽度参数,控制了函数的径向作用范围. 高斯滤波器宽度由参数 σ 表征,且 σ 越大,高斯滤波器的频带就越宽,平滑的程度就越好. 这是最常用的滤波方法.

2) 汉宁(Hanning)高通滤波

汉宁窗(Hanning Window)又称升余弦窗,可以看出三个矩形时间窗的频谱之和. 其函数时域形式可以表示为

$$w(n) = 0.5 \left(1 - \cos \frac{2\pi n}{N-1} \right), \quad (2)$$

n 为窗函数的长度, N 为滤波器的阶数.

3) 切比雪夫(Chebyshev)高通滤波

切比雪夫I型滤波器是在通带上频率响应幅度等波纹波动的滤波器一种具有等波纹特性的滤波器,其频率响应的幅度在通带中是等波纹的,在阻带上是单调的.

N 阶第一类切比雪夫滤波器的幅度与频率的关系可用下列公式表示:

$$G_n(w) = |H_n(jw)| = \frac{1}{\sqrt{1 + \varepsilon^2 T_n^2\left(\frac{w}{w_0}\right)}}, \quad (3)$$

其中, $|\varepsilon| < 1$, $[H(w_0)] = 1/\sqrt{1 + \varepsilon^2}$ 是滤波器在截止频率 w_0 的放大率, $T_N(w/w_0)$ 是 n 阶切比雪夫多项式.

已发表的条带结构的研究多采用汉宁滤波,也有用高斯滤波的. 作为比较,本文首次采用切比雪夫滤波方案,并在后文介绍这种方案的主要结果. 结果将表明这种滤波方案是提取海洋条带结构的最佳方法.

3 三种滤波方法的结果

为了提取纬向的条带状结构,我们需要对原始的时间平均的纬向速度场进行高通滤波. 由于条带状结构在经向上呈交替分布特征,因此可对经向上

的流速序列进行一维滤波. 这里的一维滤波是指将沿着经向各个格点上的纬向速度作为一组信号, 对其进行高通滤波, 然后将滤波后的纬向速度按纬向各点的顺序重新排列组成一个新的滤波后的二维

速度场. 对经向上的纬向速度分布进行高通滤波可以去除该方向上的低频变化信号, 从而保留经向上流向交替变化的特征, 同时在纬向上使流向保持一致.

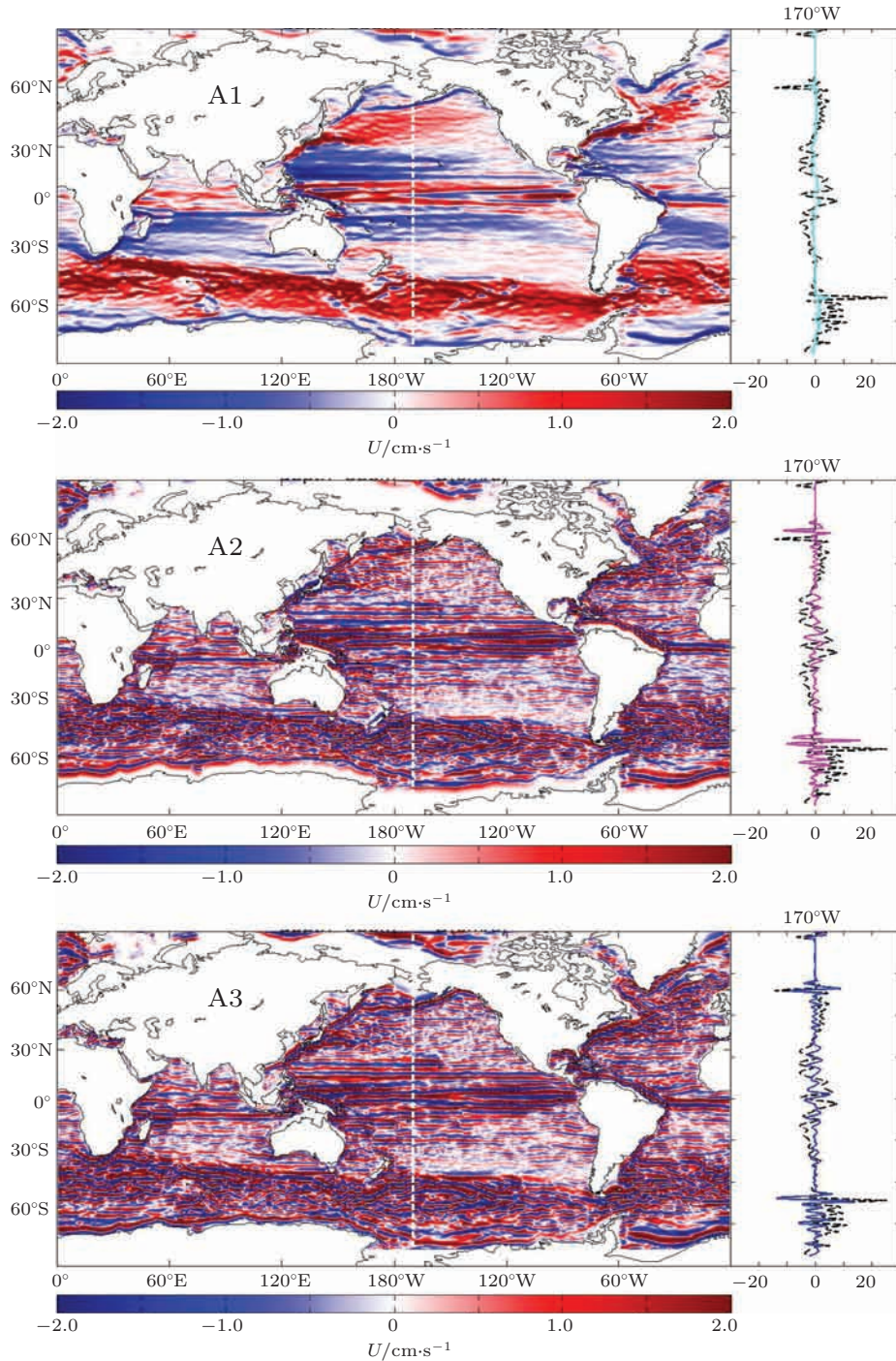


图1 (网刊彩色) SODA 数据 (2001—2010 年), 在水深 300 m 处, 对纬向流速 U 进行三种一维高通滤波得到的全球海洋的纬向射流的条带结构分布 (左侧); 右侧为 170°W 所对应的经向上的流速分布 (左侧白色虚线对应位置), 黑色虚线为滤波前的流速信号, 彩色为滤波后的流速信号 (A1) 高斯平滑; (A2) 汉宁高通滤波; (A3) 切比雪夫高通滤波

Fig. 1. (color online) Left panels: global ocean striations at depth of 300 m from SODA data (averaged over 2001–2010) obtained by three 1-D filtering methods. Right panels: zonal velocity along 170°W (indicated by the white dotted lines in left panels), the black lines for U before filtering, the color lines for U after filtering: (A1) Gauss smoothing; (A2) Hanning high-pass filtering; (A3) Chebyshev high-pass filtering.

然后, 选用三种不同的方法构建一维滤波: 简单的高斯平滑, 汉宁高通滤波和切比雪夫高通滤波(以下简称为高斯平滑, 汉宁方法, 切比雪夫方法). 高斯平滑和汉宁方法是已有的方法, 而切比雪夫方

法则是首次应用在对纬向条带结构的研究上. 实际上滤波可用的窗口函数远不止这三种, 之所以还选用了切比雪夫方法是因为考虑到切比雪夫滤波器和理想滤波器响应曲线之间的误差最小, 且在通频

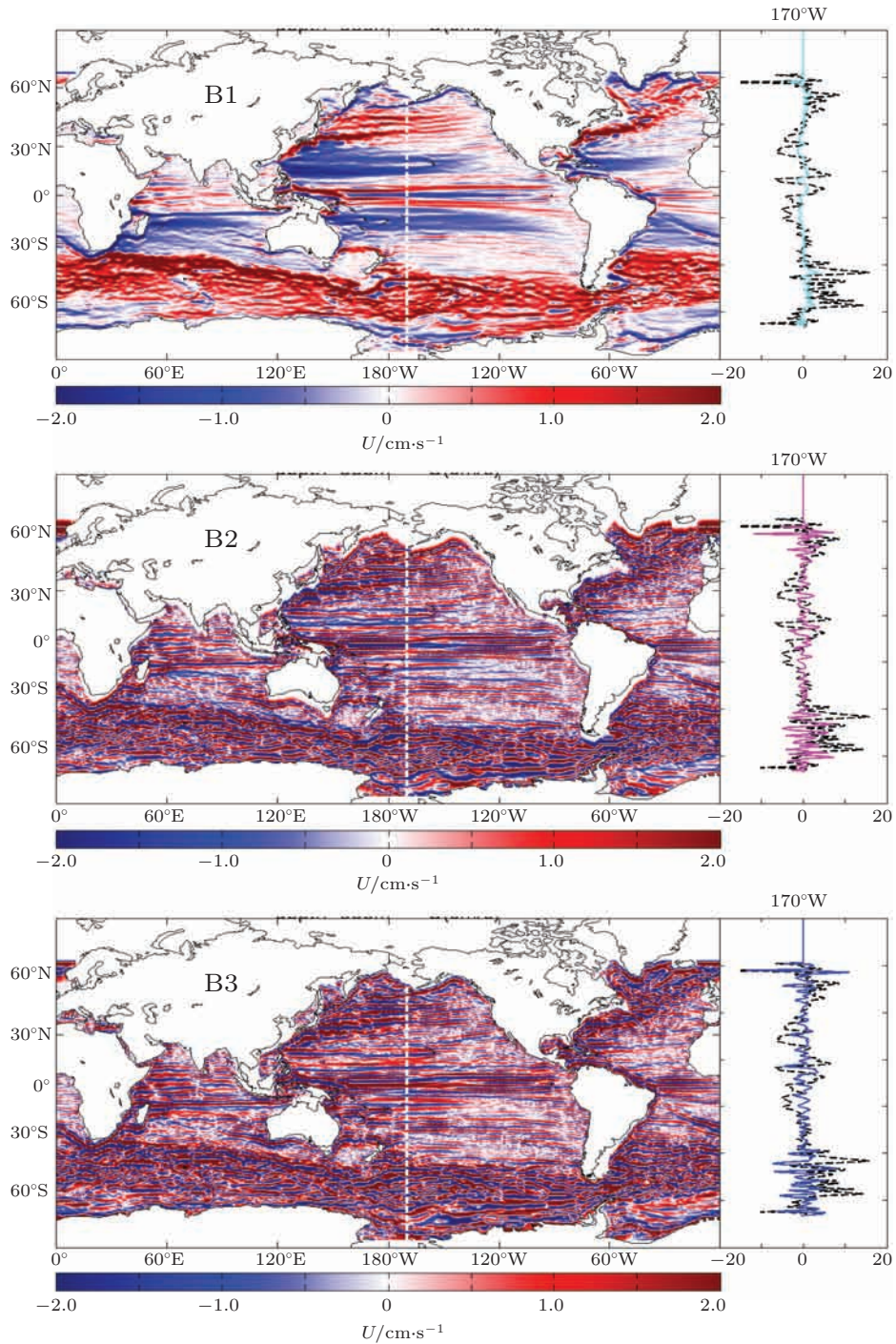


图2 (网刊彩色) LICOM 模式数据(2000—2007年), 在水深 300 m 处, 对纬向流速 U 进行三种一维高通滤波得到的全球海洋的纬向射流的条带结构分布(左侧), 右侧为 170°W 所对应的经向上的流速分布(左侧白色虚线对应位置), 黑色虚线为滤波前的流速信号, 彩色为滤波后的流速信号 (B1) 高斯平滑; (B2) 汉宁高通滤波; (B3) 切比雪夫高通滤波

Fig. 2. (color online) Left panels: global ocean striations at depth of 300 m from LICOM data (averaged over 2001–2007) obtained by three 1-D filtering methods. Right panels: zonal velocity along 170°W (indicated by the white dotted lines in left panels), the black lines for U before filtering, the color lines for U after filtering: (B1) Gauss smoothing; (B2) Hanning high-pass filtering; (B3) Chebyshev high-pass filtering.

带内频率响应幅度等波纹波动. 这些特点与所期望得到的条带结构相近似.

下面我们分别用上述三种方法对 SODA 资料和 LICOM 模式数据进行滤波处理, 并且取出一组经向数据 (170°W), 比较滤波前后的纬向速度信号的差异. 取 300 m 深的的数据作为研究对象, 结果如图 1 和图 2 所示, A 表示 SODA 数据的结果, B 表示 LICOM 数据结果.

4 三种滤波方法的比较

如图 1 和图 2 所示, SODA 数据和 LICOM 海洋模式数据的结果十分近似, 说明条带结构是确实存在的, 并不依赖于不同数据的选取. 三种滤波方法都能得到条带结构, 但高斯平滑的结果明显区别于汉宁方法和切比雪夫方法, 汉宁方法和切比雪夫方法则较为接近. 因此, 我们将三种方法分开进行讨论.

4.1 高斯平滑

高斯平滑是常用的滤波方法, 其特点是过滤数据中的异常值以体现序列的变化趋势. 高斯方法的主要参数为宽度参数 σ , σ 值越大, 滤波器的频带就越宽, 平滑的程度就越好. 从图 1 A1 和图 2 B1 中可以看出, 在太平洋东边界海域以及印度洋部分海域都有条带结构的存在. 当 σ 改变时, 纬向流场的流速会随之改变, σ 越大, 流速值越小; 但条带结构的分布特征没有显著变化. 结果表明, 尽管高斯平滑可以在局部区域获得条带结构, 但并不能体现出条带结构在全球海洋中的真实分布. 这里需要注意的是高斯平滑并不等同于高通滤波, 如果以研究条带结构为目的, 高斯平滑并不是最合适的方法.

4.2 汉宁方法和切比雪夫方法

汉宁方法和切比雪夫方法都是通过设计高通滤波器对数据进行处理, 其设计参数基本相同. 首先这里需要引入归一化的截断频率 (cutoff-frequency = [0 1]) 作为过滤低频信号、保留高频信号的分界点. 截断频率的选取取决于对原始数据的频谱分析. 大尺度过程所具有的能量往往远大于中尺度条带结构所具有的能量. 如图 3 所示, 纬向流场所具有的能量主要集中在低频部分 ([-0.1 0.1] Hz 之间), 对应的过程便是大尺度的环流, 而剩下的部分则是我们所关心的中尺度条带结

构所在的频段. 因此, 为了揭示条带结构的存在, 这里选取的截断频率值要大于 0.1. 然而当选取的截断频率值较大, 如大于 0.4 时, 在滤掉大尺度过程的同时也滤掉了大部分中尺度条带结构所具有的能量. 试验结果显示, 当选取的截断频率值在 0.1 和 0.4 之间时, 可以较好地揭示出条带结构在全球海域内的分布. 接下来讨论选取三个不同的截断频率 (cutoff-frequency = 0.1, 0.3, 0.7) 时两种滤波方法所得到的结果及其频谱分析的差异.

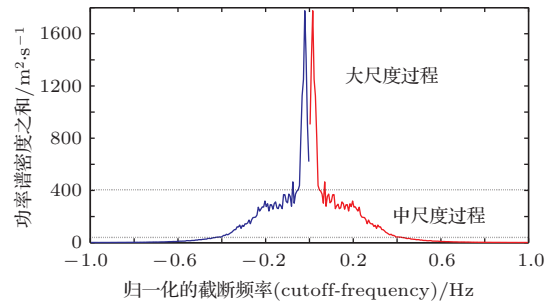


图 3 (网刊彩色) 时间平均的 SODA 数据 (2001—2010 年), 在水深 300 m 处, 对滤波前的纬向流场 U_0 采用二维周期图法得到的频谱分布 x 轴为归一化后的频率 (从 -1 到 +1), y 轴为功率谱密度 (代表所具有的能量大小), 颜色表示流向, 红色为向东 (定义为正), 蓝色为向西

Fig. 3. (color online) Spatial power spectra of original zonal velocity from SODA data (averaged over 2001–2010 and at depth of 300 m): x -axis, normalized cutoff frequency; y -axis, total zonal power spectral density; flow direction is indicated by color, red means eastwards (defined as positive) and blue means westwards.

首先取一组经向上的序列, 比较滤波前后的结果, 如图 4 所示. 横向方框中滤波前后的数据都存在一个极大值的波峰, 并且有其对应的纬度. 取三种不同截断频率滤波后, 汉宁方法所得结果波峰的位置发生了偏移, 偏移程度随着截断频率的增大而减小. 这种现象表现在海水流速的水平分布中即为流速最大值的位置发生了北移, 也就是条带结构的位置相对于真实的位置发生北偏. 而切比雪夫方法则始终保持一致. 可见, 切比雪夫方法较汉宁方法更为合适. 然后同样采用二维周期图法对滤波后的结果进行频谱分析得到如图 5 显示的结果. 随着所取截断频率的增大, 条带状结构所具有的能量在减小, 表现在纬向流场的水平分布中即为流速减小, 滤波所得的条带结构带宽变窄. 而且随着所取截断频率的增大, 汉宁方法所导致的条带结构能量衰减的速度明显大于切比雪夫方法. 当 cutoff-frequency = 0.3 时, 汉宁方法所得到的功率

谱密度的最大值约为 $35 \text{ m}^2/\text{s}$, 切比雪夫方法所得到的功率谱密度的最大值 $230 \text{ m}^2/\text{s}$. 而图 3 中当频

率为 0.3 时其对应的功率谱密度约为 $200 \text{ m}^2/\text{s}$, 所以切比雪夫方法所得结果更加接近.

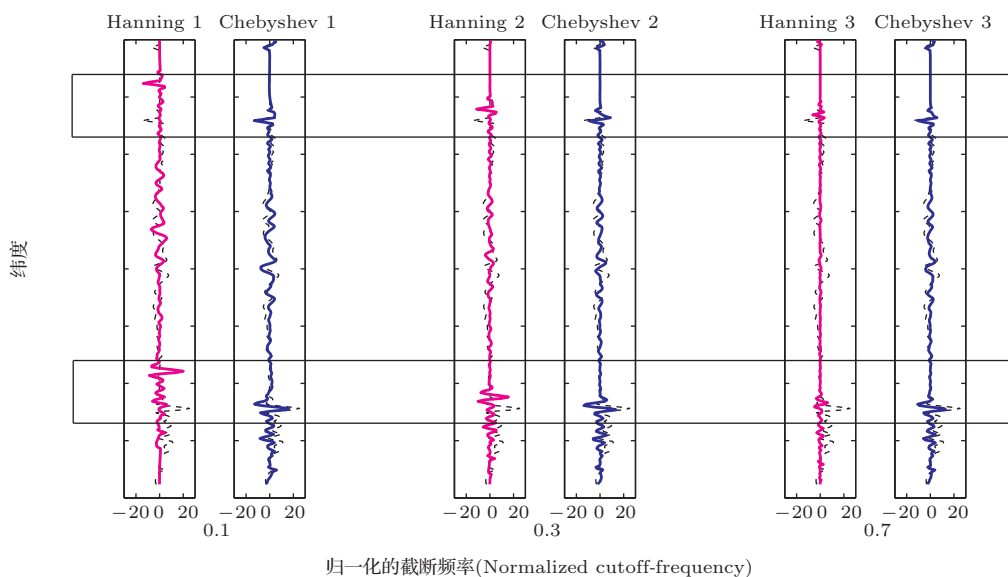


图 4 (网刊彩色) 取三个不同截止频率 (0.1, 0.3, 0.7) 时 170°W (图 1, 图 2 中白色虚线对应位置) 对应的经向上的流速分布. 黑色虚线为滤波前的流速信号, 粉色为汉宁方法的结果, 蓝色为切比雪夫方法的结果.

Fig. 4. (color online) Comparison of zonal velocity along 170°W (indicated by the white dashed lines in Figures 1 and 2) between Hanning filtering method (pink lines) and Chebyshev filtering method (blue lines) at three cutoff-frequencies (0.1, 0.3, 0.7).

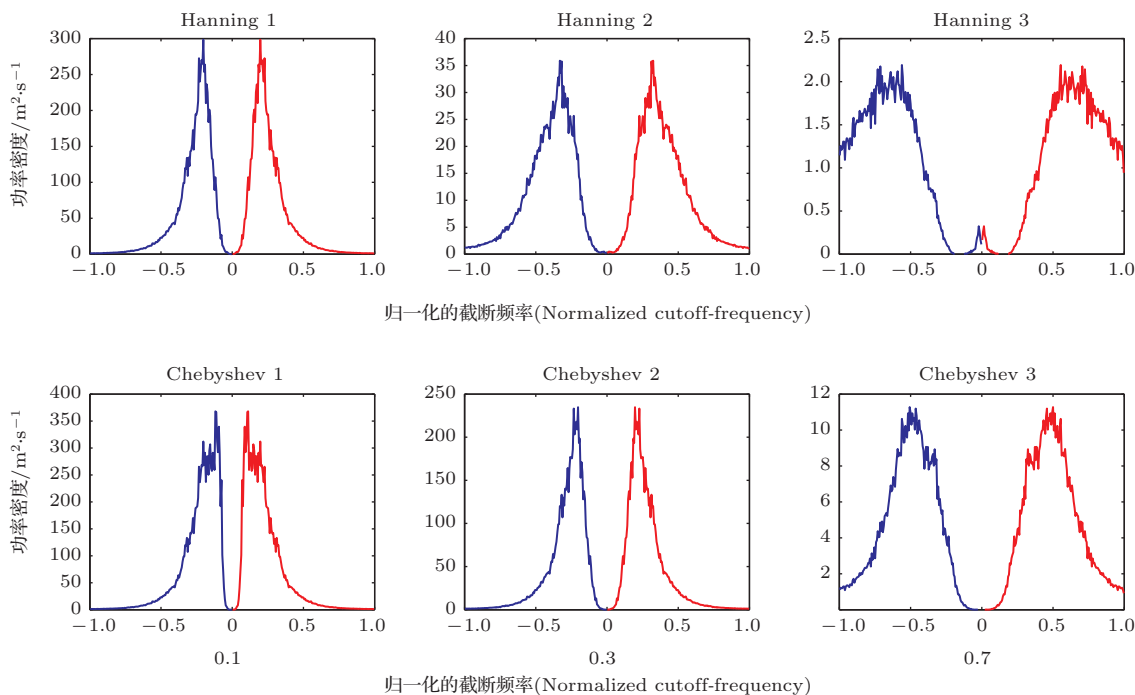


图 5 (网刊彩色) 汉宁方法 (上) 和切比雪夫方法 (下) 分别取三个不同的截止频率 (cutoff-frequency = 0.1, 0.3, 0.7) 时的滤波结果的功率谱估计. 每个子图中, x 轴为归一化后的频率 (从 -1 到 $+1$), y 轴为功率谱密度 (代表所具有的能量大小), 颜色表示流向, 红色为向东 (定义为正), 蓝色为向西.

Fig. 5. (color online) Spatial power spectra of filtered zonal velocity from SODA data (averaged over 2001–2010, at depth of 300 m) of Hanning filtering method (upper panel) and Chebyshev filtering method (lower panel) at three cutoff-frequencies (0.1, 0.3, 0.7): x -axis, normalized cutoff frequency; y -axis, total zonal power spectral density; flow direction is indicated by color, red means eastwards (defined as positive) and blue means westwards.

5 条带结构的特点

在上述对滤波方法和参数选取讨论的基础上, 下面讨论条带结构在全球海洋范围内的一些显著特点. 首先考查条带结构的分布, 见图1和图2中切比雪夫方法的结果. 除南极绕极流区外绝大多数海域都有稳定的条带结构的存在, 甚至包括如南中国海、地中海等孤立的海盆也存在条带结构. 从图1 A2, A3中可以看到条带结构在全球范围内的

一些显著的特征: 1) 在印度洋、太平洋和大西洋的整个海区内, 赤道区域的条带结构带宽较粗, 随着纬度的增加, 条带的带宽和流速都在逐渐地减小; 2) 在低纬度海域, 特别是赤道附近, 有些条带可以横跨整个海区; 3) 在湾流和黑潮及其延伸体海域, 条带并不是严格的纬向, 而是表现出向极的倾斜, 且带宽和流速较副热带海域有增加的趋势; 4) 在南极绕极流区, 尽管没有明显的稳定条带结构呈现出来, 但流向并不单一, 同样呈现出了流向交替变化的特点.

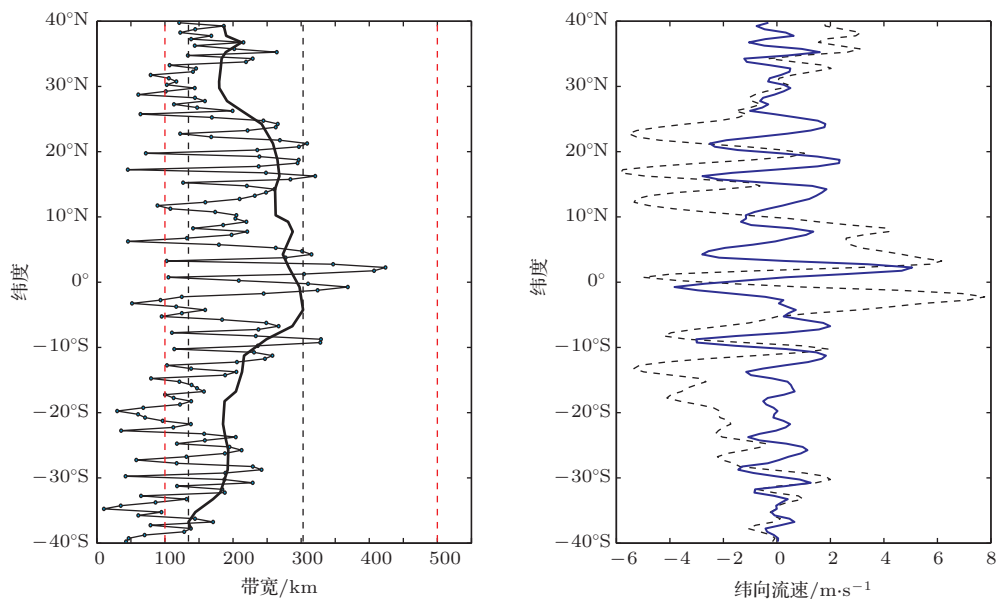


图6 (网刊彩色) 采用SODA数据, 用切比雪夫方法对太平洋中部海域(40°S—40°N)纬向流场做滤波处理的结果. 左图黑色实线为条带结构的宽度与纬度的关系(细实线为通过莱茵公式计算结果, 粗实线为细实线峰值的平滑结果), 黑色虚线为本文计算出的条带宽度的变化范围, 红色虚线为文献中提及的条带宽度的变化范围; 右图为对应纬度的经向流速在经向上的分布, 黑色虚线为滤波前的分布, 蓝色实线为滤波后的结果.

Fig. 6. (color online) Relationship between bandwidth and zonal velocity of SODA data in the central Pacific Ocean (40°S–40°N) obtained by Chebyshev filtering method. Left panel: black solid curve indicates the relation between bandwidth and latitude (thin solid curve indicates the output from the Rhines theory, heavy solid curve indicates smoothing of the thin line's peak), black dash line indicates the range of bandwidth in this paper and red dash line indicates the range of bandwidth in other publications. Right panel: distribution of zonal velocity in this area. Black dash line indicates the data before filtering, blue line indicates the data after filtering.

条带结构的带宽: 稳定的条带结构在纬向流速的分布图中呈现等振幅的波动特征, 即东西流向为等宽度分布; 若将向东的流速极值作为波峰, 那么必然存在与之相应的向西的流速波谷. 这里所讨论的条带宽度是指由一个流速波峰和一个流速波谷组成的结构在经向上所对应的纬度变化的长度, 相当于条带结构的经向波长. 通常采用两种方法计算条带结构的经向波长: 一是根据水平分布图中呈现出的条带结构, 人工数出某一纬度范围内对应的条带个数, 进而求得波长; 二是根据Rhines^[23]理论计算出不同流速和纬度时的条带波

长. Rhines尺度定义为: $L_R = (2U/\beta)^{1/2}$, 其中, U 是特征涡旋的流速, β 是行星涡度的经向梯度. 但是当某些海域的流场情况相对较复杂, 条带结构并不明显, 那么根据Rhines理论所得到的结果可能不准确, 如黑潮及其延伸体区、南极绕极流区. 此时可以计数条带个数及其所对应的纬向上的变化长度来估算条带的带宽. 本文选取了40°S到40°N的太平洋中部海域, 然后计算其带宽, 结果如图6所示. 采用SODA数据所得条带宽度在赤道区域最大, 约为300 km; 此宽度随着纬度的增加逐渐递减, 在南40°S/40°N区域, 条带宽度为150 km左右. 而

用 LICOM 模式数据所得的条带结构的宽度相对偏大, 约为 230—580 km. 图 6 中红色的虚线为以往研究得到的条带宽度的范围, 如 Maximenko 等计算研究中纬度海域 (20°N—40°N), 所得纬向射流的宽度约为 300 km, 而其在分析海表高度异常数据时, 从赤道到 60°N, 宽度最小只有 100 km [8]; Buckingham 和 Cornillon, 在研究南太平洋中部海域时计算所得的宽度最大可以达 500 km [13]. 由此可见采用切比雪夫方法所到的结果是可信的. 此外在分析宽度随纬度变化的关系时, 可以对比右图中纬向流速的变化. 在赤道区域, 条带结构的宽度最大, 对应的纬向流速同样达到最大值, 并且波峰与波峰之间的宽度也最大. 当纬向流速向两极方向递减时, 波峰之间的宽度也相应减小, 这与条带结构的宽度变化趋势保持一致, 也与分布图中直观的视图保持一致.

6 结 论

本文的分析结果表明, 三种一维滤波的方法都可以在一定程度上去除海洋大尺度过程的影响, 揭示与其共存的条带结构. 三种方法的滤波效果存在差异: 就一维滤波而言, 采用高斯平滑并不能有效揭示出条带结构; 汉宁方法和切比雪夫方法则可以有效地去除大尺度环流的影响, 可是采用汉宁方法会导致条带结构位置的偏移, 并且所得结果在相同截断频率下误差较大. 可见, 新引进的切比雪夫滤波方法不仅可以分离出条带结构, 且其效果也优于其他两种方法. 关于截断频率的选取, 试验结果显示, 当选取的截断频率值在 0.1 和 0.4 之间时, 可以较好地揭示出条带结构在全球海域内的分布. 需要注意的是当研究区域或数据分辨率改变时, 截断频率值的选取需根据具体数据的频谱分析而定. 最后, 尽管一维的滤波方法可以分离出条带结构, 但仍然有需要注意的地方: 一维滤波是将二维的纬向流场拆分成一系列经向的流信号, 它可以表现出经向上各个格点之间的关系, 但无法兼顾纬向上相邻格点之间的联系, 也就是说它可以表现出纬向射流的存在, 但同时可能忽略了非纬向的条带结构的存在. 以往的一些研究没能揭示出全球海洋普遍存在条带结构, 很可能是由于选用的滤波方法不合适所致 [7,24], 所以在解释条带的形成机理之前, 先要确

定研究区域范围内条带的真实结构. 我们将在今后的工作中进一步深入研究二维滤波方法.

参考文献

- [1] Williams G P 1978 *J. Atmosph. Sci.* **35** 1399
- [2] Soomere T 1995 *Phys. Rev. Lett.* **75** 2440
- [3] Lu H L, Chen Z Y, Li Y X, Yang K 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 085202 (in Chinese) [陆赫林, 陈忠勇, 李跃勋, 杨恺 2011 物理学报 **60** 085202]
- [4] Chen R, Liu A D, Shao M L, Hu G H, Jin X L 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 185201 (in Chinese) [陈冉, 刘阿娣, 邵明林, 胡广海, 金晓丽 2014 物理学报 **63** 185201]
- [5] Zhang Y Z, Xie T 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 035202 (in Chinese) [章扬忠, 谢涛 2014 物理学报 **63** 035202]
- [6] Shi B R 2010 *Chin. Phys. B* **19** 095201
- [7] Baldwin M P, Rhines P B, Huang H P 2007 *Science* **315** 467
- [8] Maximenko N A, Bang B, Sasaki H 2005 *Geophys. Res. Lett.* **32** L12607
- [9] van Sebille E, Kamenkovich I, Willis J K 2005 *Geophys. Res. Lett.* **38** L02606
- [10] Ollitrault M, Lankhorst M, Fratantoni D, Richardson P, Zenk W 2006 *Geophys. Res. Lett.* **33** L05605
- [11] Wang J B, Spall M A, Flierl G R, Malanotte-Rizzoli P 2012 *Geophys. Res. Lett.* **39** L10601
- [12] Maximenko N A, Melnichenko O V, Niller P P, Sasaki H 2008 *Geophys. Res. Lett.* **35** L08603
- [13] Buckingham C E, Cornillon P C 2013 *J. Geophys. Res.* **118** 448
- [14] Cravatte S, Kessler W S, Marin F 2012 *J. Phys. Oceanography* **42** 1475
- [15] Kamenkovich I, Berloff P, Pedlosky J 2009 *J. Phys. Oceanography* **39** 1631
- [16] Huang R X 2013 *J. Tropical Oceanography* **32** 1 (in Chinese) [黄瑞新 2013 热带海洋学报 **32** 1]
- [17] Qiu B, Rudnick D L, Chen S M, Kashino Y J 2013 *Geophys. Res. Lett.* **40** 2183
- [18] Davis A, Lorenzo E D, Luo H, Belmadani A, Maximenko N, Melnichenko O, Schneider N 2014 *Geophys. Res. Lett.* **41** L057956
- [19] Ivanov L M, Collins C A, Margolina T M 2012 *J. Atmosph. Oceanic Technol.* **29** 1111
- [20] Melnichenko O V, Maximenko N A, Schneider N, Sasaki H 2010 *Ocean Dynamics* **60** 653
- [21] Yu Y Q, Liu H L, Lin P F 2012 *Chin. Sci. Bull.* **57** 3908
- [22] Feng X, Liu H L, Wang F C, Yu Y Q, Yuan D L 2013 *Chin. Sci. Bull.* **58** 3504
- [23] Rhines P B 1975 *J. Fluid Mech.* **69** 417
- [24] Richards K J, Maximenko N A, Bryan F O, Sasaki H 2006 *Geophys. Res. Lett.* **33** L03605

Intercomparison of one-dimensional detecting methods of unveiling the global ocean striations*

Zhang Yu¹⁾²⁾ Guan Yu-Ping^{2)†} Chen Zhao-Hui³⁾ Liu Hai-Long⁴⁾ Huang Rui-Xin⁵⁾

1) (*Marine Science and Technology College, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316000, China*)

2) (*State Key Laboratory of Tropical Oceanography, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China*)

3) (*Key Laboratory of Physical Oceanography, Ocean University of China, Qingdao 266003, China*)

4) (*State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*)

5) (*Woods Hole Oceanographic Institution, Woods Hole, MA02543, USA*)

(Received 22 September 2014; revised manuscript received 23 February 2015)

Abstract

Striation in the ocean is a research frontier in physical oceanography. Interestingly, it has some “sisters and brothers” in Mother Nature, such as the Jovian belts, subtropical jet streams in the atmosphere, and zonal flows in plasma. This meso-scale oceanic phenomenon is, however, concomitant with but covered up by the macro-scale ocean currents or circulations. In order to unveil such zonal jet-like structures, a spatial filtering must be applied to the commonly available time-average data. Previous studies mostly focused on prominent features of striations, such as banded structures, and the generation mechanism; however, the differences revealed by applying different types of filtering methods have not received enough attention.

In this paper we present a comprehensive study on the effectiveness of the different detection approaches to unveiling the striations. Three one-dimensional filtering methods: Gaussian smoothing, Hanning and Chebyshev high-pass filtering, are used to analyze SODA data and LICOM model outputs. The first two methods have been used in many previous studies; on the other hand, the Chebyshev filter is a newcomer for this purpose. Our results show that all three methods can reveal ocean banded structures, but the Chebyshev filtering is the best choice. The Gaussian smoothing is not a high pass filter, and it can merely bring regional striations, such as those in the Eastern Pacific, to light. The Hanning high pass filter can introduce a northward shifting of stripes, so it is not as good as the Chebyshev filter.

In addition, a cutoff frequency is often needed in applying the high-pass filter, and this frequency depends on the spectrum analysis of the original data. In this paper, we discuss the filtering output and its spatial power spectra of three normalized cutoff-frequencies, 0.1, 0.3 and 0.7. When the cutoff-frequency is too low, the filtering is insufficient; on the other hand, if the cut-off frequency is too high, excessive filtering can happen. Our study shows that for analyzing the global ocean striations, the best normalized cutoff frequency domain is between 0.1 and 0.4. In addition, the bandwidth of striation for using the Chebyshev high pass filter to analyze the SODA data in a depth of 300 m is 150–300 km. In the general case, we propose to use the Chebyshev filter in lieu of Hanning or other methods for investigating ocean striations.

Keywords: turbulence, ocean striations, zonal flows, high-pass filtering

PACS: 92.10.Lq, 92.10.ah, 92.05.-x, 92.10.ak

DOI: 10.7498/aps.64.149201

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant Nos. 2013CB956201, 2013CB956204), and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 91228202, 40976011).

† Corresponding author. E-mail: guan@scsio.ac.cn