

海洋跃层的谱表达法及自适应识别^{*}

陈亮^{1,2}, 熊学军^{1,2,3*}, 李小龙⁴, 苏 劼¹

(1. 国家海洋局 第一海洋研究所, 山东 青岛 266061;

2. 海洋环境科学和数值模拟国家海洋局重点实验室, 山东 青岛 266061;

3. 青岛海洋科学与技术国家实验室, 山东 青岛 266237; 4. 中海石油深海开发有限公司, 广东 深圳 518067)

摘 要:提出了海洋跃层的全水层剖面谱表达法,通过海洋要素的垂直变化梯度零线和分布曲线把跃层形态、垂直变化过程及特征全面、系统、完整、准确地凸显出来;分别利用曲率区域最值和小波变换自适应检测法,将跃层谱峰根部的转折特征提取出来,确定了跃层与上下层水体的分界;从而形成了全面表征跃层自然属性特征的“五点三要素”法,即跃层上界点、强跃层上界点、跃层最值点、强跃层下界点、跃层下界点这五个跃层属性特征点和跃层最大强度、强跃层平均强度、跃层平均强度这三个跃层强度要素。基此,建立了一套关于跃层的定义、表达、确定和识别的系统方法,使得绘制系统而完整的跃层各类特征全海区分布图成为可能,为跃层研究和应用奠定了必要的基础。

关键词:跃层谱;端点检测;自适应识别;曲率;小波分析;五点三要素

中图分类号:P731

文献标识码:A

文章编号:1671-6647(2016)03-0328-09

doi:10.3969/j.issn.1671-6647.2016.03.001

在关于内波的研究中,需要对跃层进行明确、系统的认知、表达与把握,但基于目前能查阅到的文献,关于跃层的定义、特征、表达和识别等都不够明确、全面和系统。

首先,目前查阅到的关于海洋跃层的定义,基本都是根据海洋要素垂直剖面分布图给出的,可以归纳为两种说法:一是海洋要素随深度变化发生急剧变化的水层^[1-4];二是海洋要素随深度变化发生阶跃特征的水层^[1,5]。这样给出的跃层定义比较简单,也把握住了跃层的基本特征,但其中的“急剧变化”或“阶跃特征”都是相对的不确定量,不同海区、不同季节的差别也很大,这就需要有统一的参考或规定,否则跃层界点、强度等特征参量的确定方法就会因人而异,造成具体应用中的非可比性甚至混乱。

关于跃层的确定方法,《海洋调查规范-第七部分:海洋调查资料交换》^[6]采取了从强选取的原则,将海洋要素垂直分布曲线上曲率最大的点分别确定为跃层的顶界和底界,将顶界和底界之间的厚度确定为跃层厚度,将跃层厚度内的平均强度确定为跃层强度,并且以 200 m 为界,分别规定了浅水区和深水区的跃层强度最低标准,只有达到最低标准以上的层结才能算作跃层。在目前的技术条件下,这样规定有突出的不足:一是不完整性,这样规定的跃层其实只是跃层中最显著的部分,而自然现象本身一般都有完整性的特征,强跃层之外的往往仍比较显著的垂向梯度变化是整个跃层不可或缺的组成部分,如果割裂,对跃层的认知易停留

^{*} 收稿日期:2016-01-26

资助项目:国家科技重大专项——南海北部内波流监测、预报、预警系统研究及应用(2016ZX 05057015);海洋工程装备科研项目——500 米水深油田生产装备 TLP 自主研发—内波流预警方案研究及内波流监测系统研制;国家自然科学基金项目——黄海暖流的多时相特征及其发生机制研究(41376038);国家自然科学基金委员会-山东省人民政府联合资助海洋科学研究中心项目——海洋环境动力学和数值模拟(U1406404);国家专项子课题——黑潮结构时空变化特征对中国近海环流的影响分析(GASI-03-01-01-02);国家专项子课题——黑潮不稳定性及多核结构(GASI-IPOVAI-01-05);国家重大科学研究计划项目——太平洋印度洋对全变暖的响应及其对气候变化的调控作用-热带太平洋印度洋海洋观测(2012CB955601);海洋公益性行业科研专项——常用海底声纳测量仪器计量检测关键技术研究示范应用(200905024);国家自然科学基金青年基金项目——东海黑潮三维结构及季节变化研究(40406009)

作者简介:陈 亮(1990-),男,湖北赤壁人,硕士研究生,主要从事区域海洋动力学及调查技术方面研究。E-mail:chenliang@fio.org.cn

通讯作者:熊学军(1976-),男,河南固始人,研究员,博士,主要从事区域海洋动力学及调查技术方面研究。E-mail:xiongxi@fio.org.cn

(李 燕 编辑)

于片面性,难以系统把握;二是主观性,人为的并不统一的最低标准规定,只是沿用了早期技术条件下解决问题的权宜之计,缺少充分的依据,而且抹杀了那些强度虽然较弱但作用仍很重要的层结,并且将相联系的 200 m 水深附近海区的跃层分布因水深差异而割裂开来。目前,大多数跃层研究或应用中基本采用了从强选取的跃层确定方法,但其显然漏掉了对具体研究特别是现场应用仍有显著影响的过渡区。

上述跃层的定义和确定方法,基本都是依据海洋要素的垂直剖面分布图给出的,其局限性与海洋要素垂直剖面分布图的表达能力直接相关,并且,这种图的比例尺及纵横轴比的变化会明显影响到跃层的表达和识别。

所以,我们以内波研究中跃层的系统把握和表达为牵引,提出了全水层的海洋层结谱表达法,基此建立起一套关于跃层的定义、表达、确定和识别的系统方法。

1 全水层的海洋层结“谱”表达法

海洋中温度、盐度、密度等要素随深度的分布,称为海洋层结^[7-8]。对于流体静力学稳定平衡状态的水体,一般情况下,温度会随深度的增加而减小,盐度和密度会随深度的增加而增大。实际上,由于地球旋转、太阳辐射、海面冷却、降水、风、波浪、内波和水团运动等因素的影响,海洋要素随深度的具体变化往往比较复杂,但基本都可由以下 3 种水层状态叠置而成:1)海洋要素随深度的变化很小,几乎呈垂直均匀状态,称为均匀层,最常见的是近海面的上均匀层和近海底的下均匀层;2)海洋要素随深度的变化很大,呈现出阶跃特征,称为跃层,一般位于上均匀层和下均匀层之间;3)海洋要素随深度的变化幅度介于均匀层和跃层之间,缺乏显著、稳定的特征,多表现出抖动性或渐变性,称为弱层结层,一般位于均匀层与跃层之间或跃层与跃层之间。有的海水剖面包括了一系列跃层,且强弱差别很大,使层结结构颇为复杂。

全水层的海洋层结是一个完整的系统,跃层只是层结显著性的代表,对跃层的认识、理解与把握必须基于全水层的层结结构。在诸如声传播和内波等很多应用领域,倘忽略整个水层的其他层结结构,而只对跃层进行研究,往往会产生片面化的效果。很多研究都很有必要在对全水层层结结构系统把握的基础上,再对跃层进行重点分析。为此,从信号处理的角度出发,提出了全水层的海洋层结“谱”表达法,具体实现步骤如下:

1)数据检查。对要研究的海洋要素(如水温、盐度和密度等)剖面进行质控检查,如果因观测误差导致垂直剖面曲线有毛刺现象,需要根据海水性质的连续性原理进行平滑,从而减少全水层的海洋层结“谱”噪音信号。

2)成谱转换。将要研究的海洋要素全水层剖面对深度求一阶导数,其结果就是每个观测点处的变化梯度,从而得到海洋要素全水层的变化梯度随水深的分布,这就是全水层的海洋层结“谱”。

3)谱形图绘制。首先绘制海洋要素的垂直变化梯度零线,它是海洋层结谱的基准参考线,然后将整个水层各观测点处的变化梯度随深度的变化曲线绘制出来,形成全水层的海洋层结“谱”图。

这样以来,不仅把全水层的海洋层结全面、系统、完整、准确地表达出来,更是把跃层形态及变化特征全面、系统、完整、准确地凸显出来,而且基本避免了海洋要素垂直剖面分布图比例尺选取对跃层强度显著性表达的影响。事实上,在全水层的海洋层结“谱”图上,跃层就是其中的“谱峰”。

为解读全水层海洋层结谱图对跃层研究的重要作用,以水温为例,按照上述的步骤与方法,绘制全水层海洋层结谱图,并与相应的海洋要素垂直剖面分布图对比分析。图 1 和图 2 都是单跃层,且图 2 是逆跃层,全水层水温层结谱图不仅把整个剖面的层结特征全面、系统、定量地表达出来,更是把跃层形态及变化特征以“谱峰”的形式全面、系统、定量的凸显出来,直接避免了垂直剖面分布图在跃层表达方面的间接性和非定量性。图 3 是双跃层,水温层结谱图表现为“双谱峰”结构,双跃层之间的层结仍然较明显,且梯度变化近于渐变;相应的垂直剖面图则在跃层识别、确认和量化等方面都有不同程度的欠缺。图 4 表达了不同比例尺的海洋要素垂直剖面分布图和全水层海洋层结谱图的区别,当垂直剖面分布图的温度轴与深度轴相比较窄时,跃层强度的显著性直观较小,较宽时则直观较大,且易在下界点的确定上出现争议;而对于全水层的海洋

层结谱图,则基本不受坐标轴比例尺的影响,且将有争议下界点处的梯度变化准确、定量的表达出来,谱峰的结构比较明确地显示出剖面分布图中 AB 段和 BC 段的相互关系。

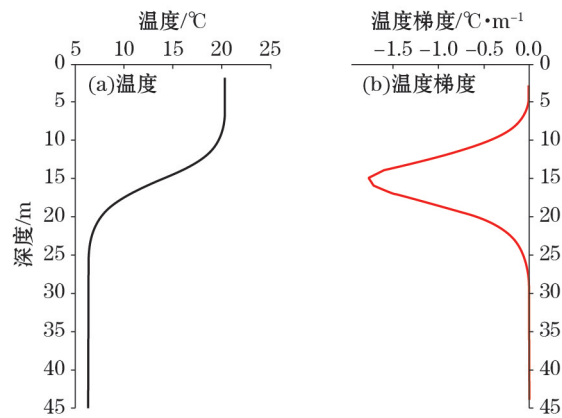


图 1 单跃层的海洋要素垂直剖面分布图与全水层海洋层结谱图

Fig. 1 Vertical profile of single spring layer and its spectrum

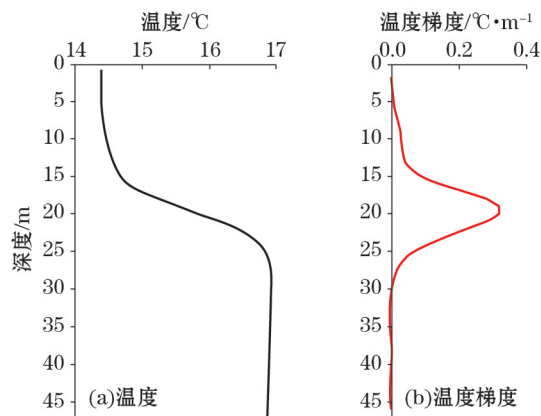


图 2 逆跃层的海洋要素垂直剖面分布图与全水层海洋层结谱图

Fig. 2 Vertical Profile of reversed spring layer and its spectrum

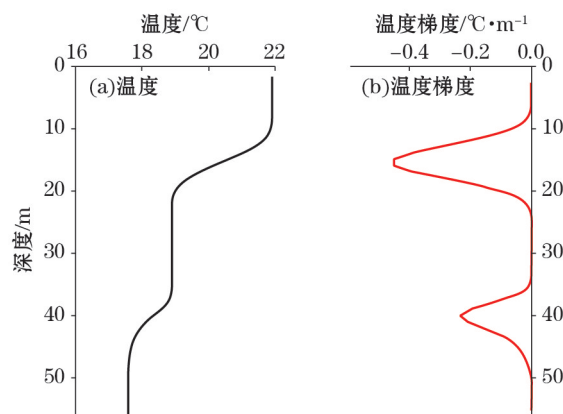


图 3 双跃层的海洋要素垂直剖面分布图与全水层海洋层结谱图

Fig. 3 Vertical profile of double spring layer and its spectrum

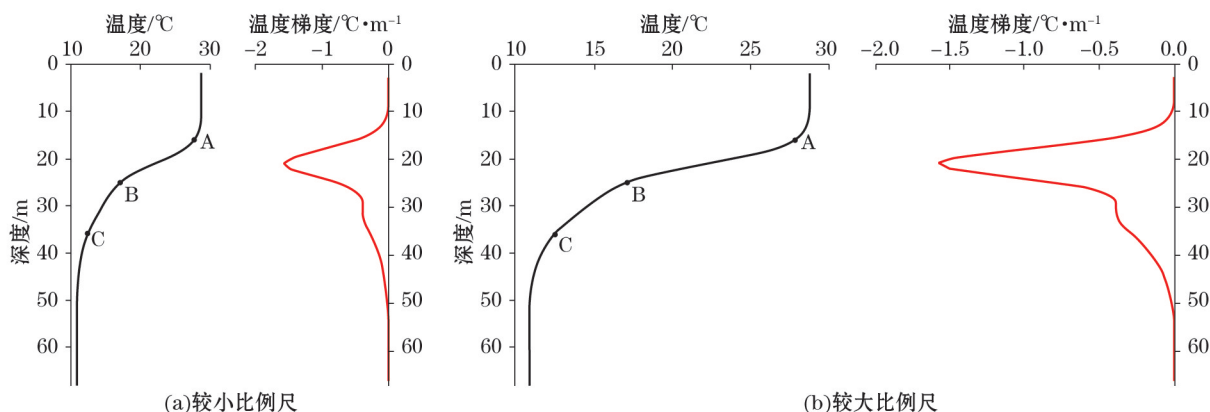


图 4 不同比例尺的海洋要素垂直剖面分布图与全水层海洋层结谱图

Fig. 4 Two different vertical profiles and their corresponding spectra

2 跃层与上下层水体分界点的自适应检测

跃层之所以成为跃层,是因为它与上下层水体存在性质差异,既然有差异,就应该存在相应的分界特征。在全水层的海洋层结谱图上,跃层可以明确表征为海洋要素垂直变化梯度曲线的谱峰区,为确定跃层与上、下水体的分界,采用数学方法对谱峰进行自适应端点检测,以发现谱峰自然存在的端点位置。

在海洋要素的全水层海洋层结谱图上,作为跃层与上下层水体分界点的谱峰端点,一方面,因为要保证整个谱峰或跃层的完整性而应该趋近于海洋要素垂直变化梯度的零线;另一方面,因为要保证跃层的强度特征而不能无限制地接近海洋要素垂直变化梯度的零线。所以,跃层谱峰端点自适应检测的关键,是分别在谱峰的上、下根部区找到距海洋要素垂直变化梯度零线适当距离、又具有自然转折属性的特征点,分别称为谱峰的上端点和下端点。

2.1 跃层谱峰端点的曲率区域最值检测法

跃层与上下水体的分界表现在海洋要素的垂直变化梯度曲线上,就应该是曲线某种性质的转折点,而曲线最直接的性质就是它的弯曲程度,所以,可以对海洋要素垂直变化梯度曲线上的点求曲率,得到曲率的垂直变化曲线,从中分别对谱峰的上、下根部区进行最值点(也即转折点)检测,从而确定谱峰端点。

曲率是曲线上点的切线方向角对弧长的转动率,通过微分来定义,表明曲线偏离直线的弯曲程度,其计算表达式为

$$K = \frac{x''}{\sqrt{(1+x'^2)^3}}, \quad (1)$$

式中, K 为曲率; x' 为海洋要素对深度的一阶导数; x'' 为海洋要素对深度的二阶导数。

如图 5 所示,对海水温度垂直变化梯度曲线上的点求曲率,得到海水温度梯度曲线的曲率垂直变化曲线,其中,在跃层谱峰上、下根部区的对应位置,的确分别存在着显著的最值点(点 A、B),表现出曲线的转折性质和跃层的分界特征,将其分别对应应在温度梯度的垂直分布曲线和海水温度的垂直分布曲线上,就得到了跃层谱峰的端点(点 C、D),也即跃层与上下水体的分界(点 E、F)。

上述表明,跃层谱峰端点的曲率区域最值检测法只根据跃层的自然属性和曲率曲线的性质,不依赖于人为主观规定的跃层强度最低标准,具有自动适应的特征。

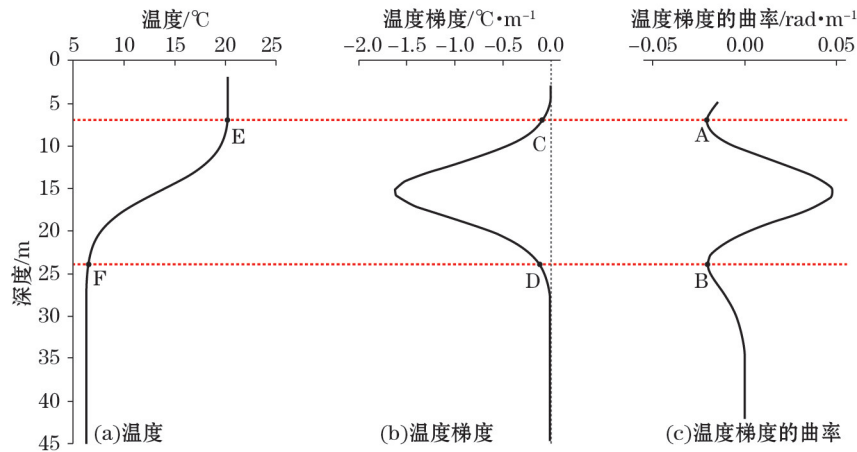


图 5 跃层谱峰端点的曲率区域最值检测法示意图

Fig. 5 Vertical profile and its corresponding spectrum and locations of maximum curvature

2.2 跃层谱峰端点的小波变换检测法

从信号处理的角度来看,既然跃层谱峰信号根部存在特征转折点,那么可以采用一定的信号处理的数学方法进行特征点的提取。小波变换是一种能够细化局部信号,放大特征变化信号的数学分析方法,可以通过对原信号与小波基函数使用卷积运算得到小波变换系数,卷积的物理含义是两个图形的相似性,即小波变换的实质是原信号与小波基函数的相似性,小波系数就是小波基函数与原信号相似的系数。因此,为实现跃层谱峰端点的小波变换有效检测,应该有如下两个原则:

1) 选择与跃层谱峰曲线比较相似的小波母函数构造小波基函数,以保证小波变换在凸显特征信号的同时,体现原始信号的总体趋势;

2) 所选择的小波母函数在谱峰根部有明确且唯一的区域最值点,也即转折特征点,以保证小波变换之后方便提取出特征信号点。

跃层谱峰曲线具有类高斯分布的特征,而 Mexican Hat 函数为高斯函数的二阶导数,它的表达式为

$$\Psi(z) = (1 - z^2)e^{-\frac{z^2}{2}}, \quad (2)$$

其波形图如图 6 所示。

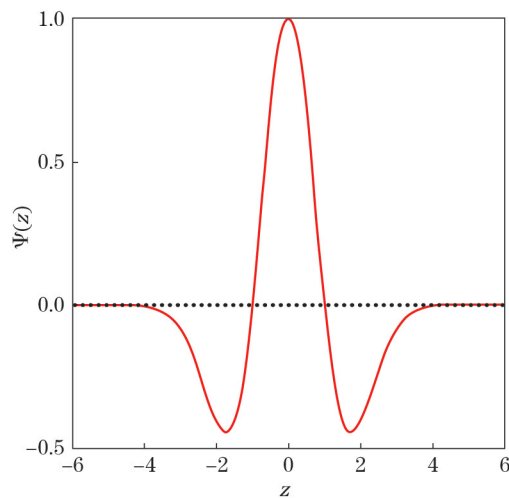


图 6 Mexican Hat 函数时域波形图

Fig. 6 Time domain waveform of Mexican Hat

Mexican Hat 小波又称 Marr 小波,满足跃层谱峰端点小波变换检测对小波母函数选择的要求,由其生成的 Marr 小波基函数和小波系数如下:

$$\begin{cases} \Psi_{a,b}(z) = \frac{1}{\sqrt{a}} \left[1 - \left(\frac{z-b}{a} \right)^2 \right] e^{-\frac{(z-b)^2}{2a^2}}, \\ W_f(a,b) = \langle f(z), \Psi_{a,b}(z) \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} f(z) \Psi_{a,b}(z) dz = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(z) \left[1 - \left(\frac{z-b}{a} \right)^2 \right] e^{-\frac{(z-b)^2}{2a^2}} dz. \end{cases} \quad (3)$$

式中, $\Psi_{a,b}(z)$ 为 $\Psi(z)$ 通过尺度伸缩和平移计算得到的小波基函数; a 为伸缩尺度; b 为平移因子; $f(z)$ 为全水层的海洋层结谱函数; $W_f(a,b)$ 为小波变换得到的小波系数。

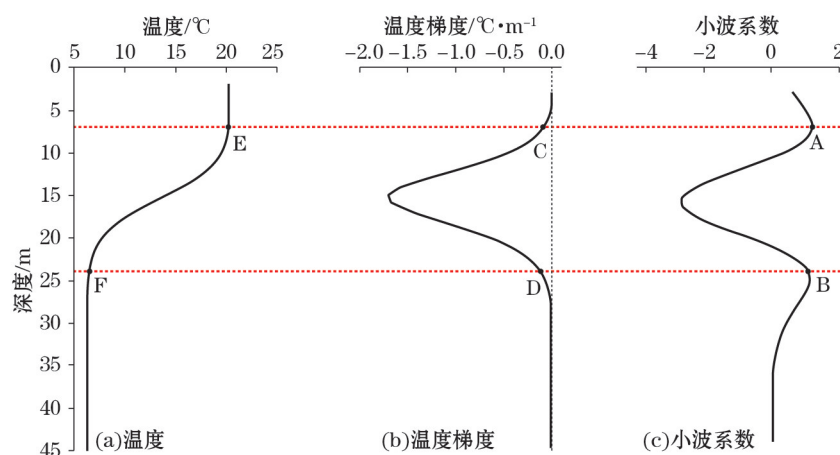


图 7 跃层谱峰端点的小波变换检测法示意图

Fig. 7 Upper and lower bounds of spring layer detected by Wavelet Transform method

如图 7 所示,同样以水温为例,将全水层的海洋层结谱进行以 Marr 小波为基函数的小波变换,其中伸缩尺度 a 取为 4,不进行平移,得到小波系数曲线图,其中,在跃层谱峰上、下根部区的对应位置,也的确分别存在着显著的小波系数最值点(点 A、B),将其分别对应应在温度梯度的垂直分布曲线和海水温度的垂直分布曲线上,就得到了跃层谱峰的端点,也即跃层与上下水体的分界(点 E、F)。

跃层谱峰端点的小波变换检测法是根据跃层的自然属性通过数学变换实现的,也具有自动适应的特征,不依赖于人为主观规定的跃层强度最低标准。

另外,无论是曲率区域最值检测,还是小波变换检测,它们在进行跃层谱峰端点检测的同时,也将谱峰顶点更显著的检测出来,只是谱峰顶点本身就很显著,所以减少了检测的必要性,但这同时说明,谱峰顶点是跃层属性最重要的特征点。

3 表征跃层的“五点三要素”

有了全水层的海洋层结谱形图,实现了跃层谱峰端点的自适应检测,结合传统的跃层表征和确定方法,可以形成一套关于跃层的定义、表征、特征及示意要素的系统方法。

在海洋要素的垂直分布曲线图和全水层海洋层结谱形图上,将基于全水层海洋层结谱形图利用跃层谱峰端点自适应检测的跃层界点位置,和基于海洋要素垂直分布曲线利用曲率最值点确定的跃层界点位置,分别全都标示出来,如图 8 所示。

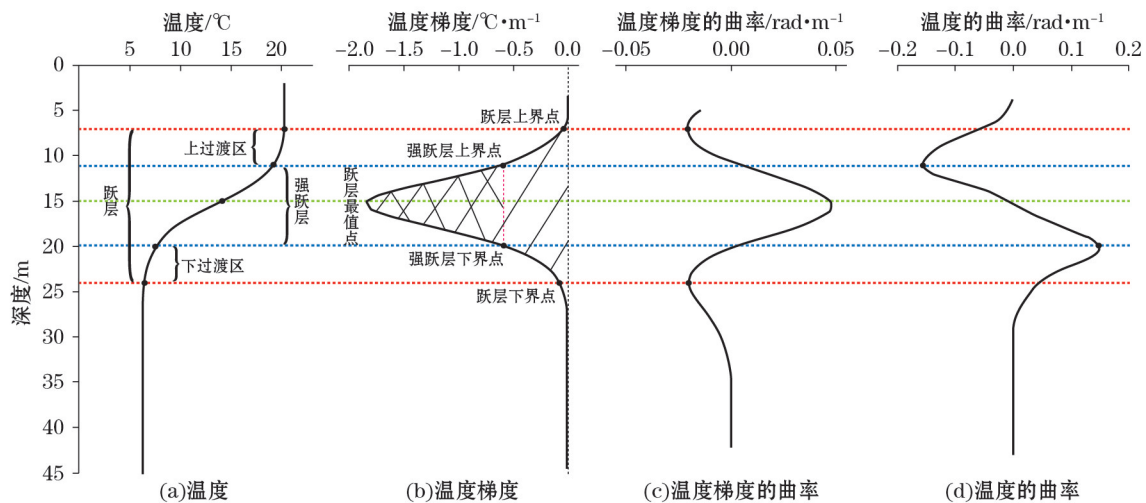


图8 跃层“五点三要素”确定示意图

Fig. 8 A diagram for key points and their locations of a spring layer

从图8可以看出,在海洋要素垂直分布曲线图上,跃层表现为海洋要素随深度变化发生阶跃特征的水层;在海洋要素全水层海洋层结谱形图上,跃层表现为海洋要素垂直变化梯度随深度变化出现的谱峰区。以谱峰顶点(即跃层强度最大值点)为中心,居上的谱峰端点称为跃层上界点,居下的谱峰端点称为跃层下界点,上、下界点之间的谱峰区称为跃层;而基于海洋要素垂直分布曲线利用曲率最值点确定的跃层恰位于谱峰区的顶点附近,实际上是跃层中的强跃层区,强跃层的上端点称为强跃层上界点,强跃层的下端点称为强跃层下界点;跃层上界点至强跃层上界点之间的水层称为上过渡区,跃层下界点至强跃层下界点之间的水层称为下过渡区。

事实上,跃层的这5个特征点是跃层本身自然属性的体现,首先是谱峰顶点,体现了整个谱峰的最大/小值,称为跃层最值点,几乎所有的跃层都具有这个跃层强度的最大/小值点;其次是跃层上界点和下界点,表明跃层和上、下水体的分界,这两点和跃层最值点一起,能够控制跃层的整体特征,该区跃层的平均强度,称为跃层平均强度;至于强跃层的上、下界点,则表明强跃层和跃层上、下过渡区的分界,这两点和跃层最值点一起,能够控制强跃层的整体特征,该区强跃层的平均强度,称为强跃层平均强度。所以,跃层上界点、强跃层上界点、跃层最值点、强跃层下界点、跃层下界点和跃层最大强度、强跃层平均强度、跃层平均强度一起,称为跃层的“五点三要素”,能够全面反映一个跃层的基本特征。

4 结 论

为了更直接、更完整、更可靠、更准确地对海洋跃层进行定义、表现、识别和表征,得到系统而完整的跃层各类特征全海区分布图,本文在把握跃层物理属性的基础上,通过数学手段对其进行表现和揭示,主要结论如下:

1) 直接用海洋要素的垂直变化梯度表现层结,得到由梯度零线和梯度垂直分布曲线构成的全水层海洋层结谱形图,从而把跃层形态、垂直变化过程及特征全面、系统、完整、准确地凸显出来。

2) 跃层与上下层水体之间的分界特征是跃层本身的自然属性,其最直接的表现就是定义跃层自身的垂直变化梯度曲线在分界处的转折性。曲率区域最值检测法直接利用谱峰曲线的弯曲特性,将分界处的转折特征表达为曲率曲线的谱峰根部区域最值点;小波变换检测法通过选择与跃层谱峰相似且端点突出的小波母函数,将分界处的转折特征表达为小波系数曲线的谱峰根部区域最值点。从而分别实现了跃层上下层水体分界点的自适应检测。

3)跃层作为水体层结最重要的现象,具有跃层上界点、强跃层上界点、跃层最值点、强跃层下界点、跃层下界点五个跃层属性的特征点,以及跃层最大强度、强跃层平均强度、跃层平均强度三个跃层强度要素,称为跃层的“五点三要素”,能够全面表征一个跃层的基本特征。其中,跃层上界点、跃层下界点和跃层最值点一起,控制了跃层的平均强度,能够体现跃层的全面性、整体性特征;强跃层上界点、强跃层下界点和跃层最值点一起,控制了强跃层的平均强度,能够体现强跃层的显著性特征;最值得强调的是跃层最值点和跃层最大强度,其对跃层特征的代表性和实际应用有重要意义。

至此,在物理具象明确、数学方法清楚的原则要求下,提出了全水层的海洋层结谱表达法,基本建立起一套关于跃层的定义、表达、确定和识别的系统方法。

参考文献(References):

- [1] ZHOU Y X. Statical analysis ocean thermocline on the South China Sea[D]. Qingdao: Qingdao Ocean University, 2002. 周燕遐. 南海海洋温度跃层统计分析[D]. 青岛:青岛海洋大学, 2002.
- [2] XIONG W Y, ZHOU J F. The military big dictionary[M]. Beijing: The Great Wall Press, 2000. 熊武一, 周家法. 军事大辞海[M]. 北京:长城出版社, 2000.
- [3] PICKARD G L, EMERY W J. Descriptive physical oceanography: An introduction[M]. America: Academic Press, 2011:76.
- [4] SPRINTALL J, TOMCZAK M. Evidence of the barrier layer in the surface layer of the tropics[J]. Journal of Geophysical Research, 1992, 97(C5): 7305-7316.
- [5] YAN H M. A dictionary of marine science[M]. Shenyang: Liaoning People's Publishing House, 1998. 严宏谟. 海洋大辞典[M]. 沈阳:辽宁人民出版社, 1998.
- [6] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of The People's Republic of China. The specifications for oceanographic survey-Part 7: Exchange of oceanographic survey data. GB/T 12763. 7—2007[S]. Beijing: Standards Press of China, 2007. 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 海洋调查规范-第七部分: 海洋调查资料交换. GB/T 12763. 7—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [7] FANG X H, DU T. Fundamentals of oceanic internal waves and internal waves in the China Sea[M]. Qingdao: China Ocean University Press, 2005: 1-10. 方欣华, 杜涛. 海洋内波基础和中国海内波[M]. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2005: 1-10.
- [8] JOHN M, HELEN J, RICHARD K, et al. Can eddies set ocean stratification[J]? Journal of Physical Oceanography, 2002, 32(1):26-38.

Spectral Expression and Self-adjusting Detection of Spring Layer

CHEN Liang¹, XIONG Xue-jun^{1,2,3}, LI Xiao-long⁴, SU Jie¹

(1. *The First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao 266061, China;*

2. *Key Lab of Marine Science and Numerical Modeling, SOA, Qingdao 266061, China;*

3. *Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China;*

4. *CNOOC Deepwater Exploitation Co. Ltd., Shenzhen 518067, China*)

Abstract: A spectral method expressing the entire vertical profile of spring layer is proposed. With this method, the vertical characteristics of spring layer can be well expressed with the vertical distribution of the gradient of marine variables combined with a reference line though the zero point of this distribution. The upper and lower bounds can be determined by the minimum curvature of the spring layer spectrum and wavelet transform method, which can be defined as 'Five points and three factors'. Five key elements of this method includes the upper bound of spring layer, upper bound of major spring layer, the maximum of spring layer, lower bound of major spring layer, and lower bound of spring layer; the three strength-related factors of spring layer are the maximum intensity of spring layer, average intensity of major spring layer and average intensity of spring layer. Based on this method, we can describe the spring layer and determine its characteristic objectively and comprehensively, which are helpful for studying the spring layer and its related applications.

Key words: spectrum of spring layer; bound detection; self-adjusting; curvature; wavelet transform analysis; five points and three factors

Received: January 26, 2016