

大区域海洋遥感数据处理方法研究

Researches of processing methods on large-scale marine remote sensing data

应晨璐^{1,2}, 董庆¹, 薛存金¹, 温晓阳¹

(1. 中国科学院 遥感与数字地球研究所 数字地球重点实验室, 北京 100094; 2. 中国科学院大学, 北京 100094)

中图分类号: P714; P237 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2014)08-0116-10

doi: 10.11759/hyxx2013010500

卫星遥感是现代海洋大尺度观测的主要技术手段。30 多年来, 对地观测卫星积累了大量的海洋观测数据, 在区域海洋科学研究中得到了广泛的应用和关注, 对遥感数据集的精度也做了许多分析和评价^[1-5]。利用海洋卫星、资源卫星和气象卫星的数据, 建立了长时序列连续立体观测数据库。从这些数据支撑下的研究发现, 西太平洋、东太平洋、北大西洋、黑海等海域对整个海气相互作用系统起着至关重要的作用, 从中找到了一些区域, 如用厄尔尼诺区的异常海温指示厄尔尼诺事件^[6-7]、IDO 指示年代际气候振荡^[8]等指示性区域, 重点分析这些代表性区域有助于见微知著, 把握现象背后的内在规律。如何更有效地找到对气候影响较大的海域, 高效地探索这些区域不同要素的时空变化规律, 进而预测海洋现象, 分析造成这种现象的自然因素(气候突变、水循环、大气循环等)和人为因素(人类活动造成全球升温等)及其影响, 是目前对海观测与海洋工作者应该回答的问题。同时, 为准确预报海洋环境和海洋灾害, 要求海洋资料处理分析工作必须由定性分析为主发展到定量分析为主。因此, “唤醒”沉睡的数据, 从纷繁复杂的数据中得到有用的信息, 是海洋遥感的目的之一。目前海洋数据处理方法以点数据处理方法为主, 而遥感观测数据以面为主, 因此, 需要以海洋学、大气学为背景, 结合地理信息学科方法, 发展能有效使用遥感观测数据的处理技术与方法。在此领域, 已有对部分海域时空特征大量的观测和分析, 形成了很多数据处理方法并已得到很好的应用。

海洋观测数据处理方法是在探索海洋现象背后

的规律过程中发展起来的方法论。针对不同的研究目的和数据源, 发展了大量海洋观测数据处理方法, 但这些方法的物理意义和应用领域存在差异, 因而, 有必要对现有的海洋数据处理方法进行梳理, 为发展大尺度多元海洋遥感数据处理方法奠定基础。作者根据研究目的和数据处理的原理, 将目前海洋观测数据处理方法归纳为 4 类: 面向特征的时空提取方法、时空相关分析方法、基于模型的数值模拟方法、数据驱动的多维关联分析方法。

1 面向特征的时空提取方法

面向特征的时空提取方法, 其基本原理是从时空数据的基本特征出发, 基于研究目的的不同, 提取要素场本身的固有特征, 主要应用于分析要素场的时间变化规律和空间分布特征。主要有统计分析方法、谱分析方法、经验正交函数分解方法(Empirical Orthogonal Function, EOF)、精细模式提取法等。

1.1 统计分析方法

简单统计分析方法运用趋势分析、均值分析等方法和分析对象的有关知识, 结合定量和定性方法

收稿日期: 2013-01-05; 修回日期: 2013-03-18

基金项目: 国家“973”计划资助项目(2009CB723903); 中国科学院对地观测与数字地球科学中心主任创新基金项目(Y2ZZ18101B); 国家自然科学基金资助项目(40901194)

作者简介: 应晨璐(1988-), 女, 浙江金华人, 硕士, 主要从事多元海洋遥感数据处理与信息挖掘的研究, 电话: 13957990613, E-mail: yingchenlu2006@163.com; 董庆, 通信作者, 电话: 13911609748, E-mail: qdong@ceode.ac.cn

进行研究,在海洋数据处理中已十分成熟。MacKenzie 等^[9]在分析温度变化趋势项时,基于随时间线性变化的假设,对海温均值进行最小二乘拟合,得出的线性方程表示温度在时间上的变化,从线性模型的走向可以看出长期的变化趋势,斜率体现了变化的强度。若对两要素间进行线性回归分析,则斜率为两要素间相互作用的强烈程度^[10-11]。相关分析也是普遍采用的统计分析方法,在研究西太平洋暖池的时空变化特征和厄尔尼诺/南方涛动的关系时,要素有很多:西太平洋暖池东界的纬向变化^[12]、赤道太平洋纬向风应力、上层纬向流异常^[13]、西太平洋副热带高压指数^[14]等。用不同的要素与 Nino3 区的海表温度距平做相关分析,相关系数的大小表示线性相关关系的强弱,比如,陈锦年等^[15]用相关分析方法分别对表层海温和次表层海温与 Nino 3 区海温进行相关分析,证明西太平洋暖池对 ENSO 的贡献来自次表层异常海温的东传。相关分析方法物理意义明确,使用简单,应用广泛^[11-12, 14, 16-17]。线性回归分析与相关分析一样,只能检验两要素间的线性关系而不能对非线性关系作定量分析。

1.2 谱分析方法

在快速傅立叶变换应用于计算机后,基于傅立叶变换的谱分析方法得到了广泛的应用,主要用于提取时间序列的振荡周期。目前使用最广泛的有功率谱分析方法、最大熵谱分析方法、小波分析方法,还有近几年发展的经验模态分解-希尔伯特-黄氏变换方法(Empirical Mode Decomposition-Hilbert-Huang Transform, EMD-HHT)。功率谱分析将时间序列的能量分解到不同频率分量上,根据不同频率分量的方差贡献或能量提取出该序列的主要周期。齐庆华等^[11]利用 Cooley-Tukey 的谱分析方法对西太暖池东界进行分析,其结果表明西太平洋暖池东界的变化周期为 3.7a, 准 2a, 5.0a, 与 Nino3 区的海温距平的周期相同。最大熵法基于自回归(AutoRegressive, AR)模型的估计,先被应用到大气科学计算中^[18],在获得成功后引入到海洋要素序列的谱分析中。张启龙等^[14]分别对西太平洋东区 5 月份的海温距平和山东夏季的降水距平做最大熵谱分析,揭示温度和降水的变化规律。小波变换是传统傅立叶分析的发展,将空域中复杂的卷积运算转换为频域中简单的乘积运算,频率越高,小波窗口越窄,离散化后能构成正交系,有较好的局部化特征^[16, 19]。在海洋要素的周期

分析中,张启龙等^[12]利用 1950 年~2000 年的太平洋月平均 SST 资料,运用 Morlet 小波分析方法,结果表明暖池表层暖水纬向运移有明显的年际和年代际变化。Huang 等^[20]在 1998 年提出的经验模态分解-希尔伯特-黄氏变换方法,包括经验模态分解和希尔伯特-黄氏变换。经验模态分解将不同频率的波动或趋势分量从原序列中提取出来,作为不同尺度的本征模态函数,希尔伯特-黄氏变换将经验模态分解得到的本征模态函数进行希尔伯特变换,得到本征模态函数的瞬时频率和振幅,获得振幅-频率-时间的三维谱。黄大吉等^[21]在此基础上进行改进,将此方法应用于预测。

最大熵谱分析方法较功率谱分析方法的改进之处在于,功率谱分析假设原始序列之外的数据为零,最大熵分析方法用自回归模型假设原始序列之外的数据,因此最大熵谱分析的结果更平滑,分辨力也更高^[22]。小波分析不仅可以给出序列的变化周期^[23],还能指示出序列频率发生变化的时间位置,在气象和海洋学中得到了广泛的应用^[12-13, 24]。EMD-HHT 方法与傅立叶谱分析相比,消除了为反映非线性、非平稳过程而引入的无物理意义的简谐波,得到的振幅和频率是随时间变化的。EMD-HHT 方法与小波分析相比,继承了小波分析的优点,克服了小波分析在频率分量上不清晰的不足。由于经验模态分解基于信号局部变化特性,且具有自适应性,适合于处理非线性、非平稳信号^[25]。

1.3 EOF 方法

EOF 方法在地球科学分析中,用于研究要素场的各个模态,即空间分布及其对应的时间系数,将要素场的变化集中在几个主要模态上,从而通过对主要模态的分析,掌握要素场的主要时空特征。从数据处理的角度,EOF 方法将原要素的时空场分解为正交函数的线性组合,提取出少数相互正交的典型模态,每个模态包括空间型及其对应的时间指数,典型模态尽可能多的包含原要素场的信息,尽可能少的降低丢失信息^[1]。在气候和海洋领域中广泛应用 EOF 方法作为数据压缩和降低纬度的有力工具。针对前人^[26-30]在 EOF 总结上的不系统性,Hannachi 等^[31]对 EOF 方法及其改进的相关技术在气象中的应用作了详细的总结和更新。Miles 等^[32]分别对 2003 年~2008 年 Cape Canaveral 到 Cape Hatteras 之间沿海区域的海温和叶绿素进行 EOF 分析,结果表明,海温

和叶绿素的第一模态均呈明显的年变化趋势,海温第一模态滞后叶绿素第一模态大约一个月,叶绿素第一空间型有明显的局部化特征。海温第二模态也呈年变化,与海表面风场作用相关,叶绿素第二模态与河流运输情况相一致。运用 EOF 方法不仅可以分析出要素场不同成分的空间分布,还能根据时间系数分析出该要素场中各成分所占的贡献及变化规律^[33]。很多文献在得到 EOF 分解场后对各成分的时间系数进行谱分析,可以清楚地看到该成分的变化周期,有助于结合其他海洋要素进行关联分析^[34]。

1.4 精细模式提取法

类 EOF 方法运用于质量不高的数据集时,会产生错误的解释,基于此,Chen^[35]在处理全球降雨量数据的时候提出了一个新的模式提取方法。该方法首先将所有原始三维数据经距平处理得到三维距平时间序列,然后用递增的时间间隔对每个测点的时间序列进行谐波分析,由此可以得到两个三维矩阵:相位阵和幅度阵,随后的分析都在这两个矩阵上进行。该方法应用于单要素时空分析,能提取出更多的模态信息。Chen 将该方法应用于分析全球海表温度模态分析^[36],海平面高度时间尺度分析^[37],均得到了更精细的时空信息。

2 时空相关分析方法

时空相关分析方法运用相关性作为两个要素场之间关联性的衡量标准,从时间和空间两个维度分析要素场之间的关联关系。奇异值分解方法(Singular Value Decomposition, SVD)和典型相关分析方法(Canonical Correlation Analysis, CCA)已广泛应用到探索两个变量场之间空间分布关系和时间相关关系。

SVD 方法将两个变量场生成交叉协方差矩阵,然后执行奇异值分解过程。该方法可用来分析要素场中具有特征意义的空间、时间格局函数,其时间系数的相关表示每对空间向量之间线性组合的相关程度。Cherry^[38]在文中叙述了奇异值分析方法的原理及应用。第一次将 SVD 作为诊断工具应用于气象中是在 1976 年,Prohaska^[39]用 SVD 方法探索北太平洋海平面气压与美国月平均地面气温之间的关系。SVD 方法在沉寂近 10 年后为研究者所重视,取得了很多有价值的成果^[40],Wallace 等^[41]用 1946 年~1985 年的海温数据和 500-mb 高度资料做奇异值分析,探索了支配海温变化的原因。魏凤英等^[42]将北美陆地气温

场与中国夏季降水场进行奇异值分解,结果表明,北美陆地气温与中国降水存在明显的线性相关。Sewell 等^[43]用奇异值分析方法分析印度洋-太平洋区域的海温变化,结果显示东赤道太平洋和赤道印度洋的海温有强烈的相关关系,且东赤道太平洋海温滞后于印度洋海温 3 个月。Lau 等^[44]用 1979 年~1998 年 5 月到 9 月的降雨量、SST、风场的再分析数据,运用 SVD 方法,通过分析亚洲夏季 SST 模式,重新评估季风与 ENSO 之间的关系,与对 SST 进行 EOF 的结果做对比,SVD 的结果在印度洋和西太平洋海域展现出更多的时空特征,这是因为数据矩阵的奇异值具有很好的稳定性。

CCA 方法通过研究典型变量之间的相关系数,运用严谨的数学方法,最大化两组变量之间的相关系数,寻找使相关系数最大的线性组合,将原来较多的变量转化为少数几个典型变量,在两个变量场的相关研究中应用广泛。Barnett^[45]用 CCA 方法分析不同地区海表温度、海平面气压和气温之间的相关关系,分别确定海表温度和海面气压以及过去气温对当前美国地表气温的影响,预测美国地表气温。Smith 等^[46]采用 CCA 方法对海表面气压和海表面温度进行分析,在此基础上,重建降雨序列。Bretherton 等^[47]对分析气象数据的耦合模态方法进行了对比,结果表明 CCA 方法比 SVD 方法略精确,但是使用比 SVD 方法复杂。

3 基于模型的数值模拟方法

基于模型的数值模拟方法并不直接应用海洋遥感数据,通过资料同化技术将遥感数据作为模型初值或边值场应用到数值模型中。数值模拟研究是基于物理海洋机制,对海洋要素进行模拟的研究方法,物理意义明确。目前应用较为广泛的有 POM (Princeton Ocean Model, POM) 模式、FVCOM(Finite Volume Coastal Ocean Model, FVCOM)模式、HAM-SOM(Hamburg Shelf Ocean Model, HAMSOM)模式、HYCOM(Hybrid Coordinate Ocean Model, HYCOM)模式 ROMS(Regional Ocean Model System, ROMS)模式等,每个模式有其适用的海域和研究问题。

POM 模式是 1977 年由美国普林斯顿大学建立,基于三维斜压原始方程数值的海洋模式,经多次修改,多应用于河口、近岸海区。蒋小平等^[48]利用 POM 模式对环台湾岛海域的水平环流、温度场、上升流 3 个水文要素进行数值模拟,得到了台湾岛东

岸的黑潮在冬季不存在直接进入台湾海峡的分支, 西岸的东北向流在冬季各个层次上都存在等分析结果。

FVCOM 模式是 2000 年建立的海洋环流与生态模型, 仍在不断升级。该模式采用有限体积数值离散方法对三维水动力原始控制方程求解, 计算效率高, 岸界拟合灵活。该模式在研究岛屿密集多, 近海岸线复杂的情况下有很好的适用性^[49-50], 且能较好地拟合复杂的海底地形。

HAMSOM 模式是一个由德国汉堡大学开发的三维斜压原始数值海洋模式, 是一垂向分层模式, 控制方程建立在任一垂向层上, 层之间通过垂向动量交换联系, 专门针对陆架浅海进行物理简化, 常用于边缘海以及陆架海域的数值模拟^[51-53]。

HYCOM 模式是在美国迈阿密大学等密度面坐标海洋模式 (Miami Isopycnic Coordinate Ocean Model, MICOM) 基础上发展起来的, 适用于层化效应显著的大洋, 经过不断改进, 也能使该模式适用于浅海和非层化稳定海域^[54-55]。

ROMS 区域海洋模式系统由罗格斯大学和加州大学洛杉矶分校两校共同开发完成, 是一个三维非线性、自由表面的斜压原始方程模式。该模式可以模拟不同尺度的运动, 使用的 S(Stretched) 坐标系能够适当的描述流场受地形的影响。Shchepetkin 等^[56-57]对 ROMS 模式的结构做了详细的描述。

根据世界气候研究计划 2006 年的统计, 世界上约有 40 多个海洋模式, 除以上几个模式外, 还有很多具有自身特点和优势的海洋模式如 FOAM(Fast Ocean Atmosphere Model, FOAM) 模式, 适用于海气耦合研究。目前尚未有一个模式可以完美演绎所有海洋过程, 在海洋模式选取的过程中, 需要根据研究区域和研究目的选择恰当的数值模式。

4 数据驱动的多维关联分析方法

数据驱动的多维关联分析方法以数据为出发点, 利用时空挖掘算法和案例推理模型, 从海量数据中探索潜在的时空关联知识。随着卫星遥感技术的发展和长时间序列海洋数据的积累, 该类方法因无需任何先验知识, 近年来在海洋科学领域取得了广泛应用, 比如, 海洋要素场的时空关联分析^[58-62]和海洋异常指数的提取^[63]。

4.1 时空关联规则分析

数据挖掘的关联规则分析是近几年发展起来用

于分析多变量场之间的时空关联规则挖掘方法。该方法提供了两个以上要素场的时空分析, 且十分适用于海量数据的处理, 自应用到海洋数据分析以来引起了广泛的关注。2001 年 Tan 等^[58]用 Apriori 关联规则挖掘算法, 分别将净初级生产力、海表温度、降雨量、光合有效辐射分量 4 个要素的降低和升高做成该事件中的不同项集, 进行 4 个海洋要素的关联规则分析。Huang 等^[59]运用 PrefixSpan 算法, 对台湾附近的水域进行了研究。利用同心圆的分割研究区域, 将温度和盐度变化的程度离散量化, 用二进制表示, 分别加载研究区域的空间信息和时间信息, 时间信息以时间窗的行数加载, 运用 PrefixSpan 算法, 得到的关联规则描述了更详细的信息, 比如, 5 项集的一条关联规则为: <A1.SDL(0), A2.SDL(0), H1.TRL(1), G1.NOR(2), A1.TRL(3)>, 其语义为: 如果 A1, A2 区域盐度下降, 则 1 个月内在 H1 区域温度略有上升, 3 个月内在 A1 区域温度略有上升。该方法将不同地点的温度盐度变化提取出来的同时, 更将其地点对应的时间变化也分析出来。苏奋振等^[64]对数据挖掘方法应用到提取海洋温度场和渔场形成的时空关联规则做了详细的介绍和验证。柴思跃等^[65]以地理数据的周期性建立周期表, 挖掘大洋暖池和南京地区降水之间的时空关联规则。关联规则分析不仅可以用于两个要素之间的分析, 也能用于单要素或多要素, 只须将其属性列为不同的项集即可, 适用性也较广, 很多研究者在各自的领域对数据挖掘算法进行了改进^[66]。需要注意的是, 目前对于时间信息的处理, 只能利用周期的方式加入^[59, 64], 面对多个要素, 需要衡量多要素之间的联系设定周期。

4.2 案例推理

案例推理通过重用或修改以前解决相似问题的方案来实现相似性推理, 主要包括 4 个过程: 案例检索、案例重用、案例修正和案例保存。Holt^[67]针对环境、生态进程中的相似性进行了描述项的分析, 在对环境和地理复杂性的研究中提出, 环境的建模可以不用经过抽象而依靠自身的相似性进行建模。因此该方法在分析不同要素时空关联的基础上, 由于其基于相似性推理的原理, 还广泛应用于预测。杜云艳等^[61]提出将案例推理应用到地理案例推理中, 文中将盐度和中心渔场的时间和空间位置作为描述中心渔场的主要要素, 一个中心渔场案例采用时间、空间和属性 3 个编

码进行综合表达,如 $26_{20}(1316_{20}, 19900501_{20})$, 代表 1990 年 5 月第一周的 4 号中心渔场, 该渔场的中心位置在该区域的第 13 行第 16 列(30.5°N, 125.5°E)对应的环境要素, 即温度为 26 °C。根据相似度选择历史案例并推理新的地理案件, 即预测中心渔场。案例推理方法根据应用目的不同, 选择合理的事件属性进行描述, 根据描述项将历史案例分类, 对根据相似度选择出的结果进行分类。

5 讨论与展望

从时空特征提取的角度分析, 谱分析方法旨在提取时间序列上的周期特征, 而 EOF 方法和精细模式提取法, 针对“面”数据, 提取要素场的空间分布和时间特征。使用 EOF 方法对 1985 年~2009 年的海表温度(SST)数据进行处理, 选择 16°S~16°N、120°E~150°W 西太暖池区域进行研究, 第一模态如图 1 所示。从图中可以看出, EOF 方法对分析区域性海洋要素特征有十分明显的特点: (1)空间分布十分直观; (2)将主要时间变化浓缩到一个时间序列, 便于分析时间规律。EOF 方法用于提取单要素场的时空特征时, 由于无需人为规定任何函数形式, 因此能客观反映要素场的主要特征。但在应用 EOF 方法时需要注意一些问题, 比如, 陈卓奇等^[68]在用 EOF 方法对相同数据来源的月平均和 10 d 平均的西太平洋海温

距平进行分析时, 两者的结果却正好相反, 究其原因是在计算过程中取到了反向的特征向量, 因此使用 EOF 方法必须同时结合空间分布和时间系数对结果进行分析。需要注意的是, EOF 模态不一定对应于动力学模态^[69], 模态之间也不一定满足统计独立性, 且 EOF 方法人为地假定了模态之间是正交的, 这对于分析非正交模态的要素场不太合适^[70]。精细模式提取法在海洋观测数据的三维矩阵上进行, 对每个观测点的时间序列进行谱分析, 将观测点的时间特征和相邻观测点的关联最大化, 因此能取得比 EOF 更多的时空信息。此外, 由于精细模式提取法对每个观测点均进行了不同时间间隔的谱分析, 即对每个点进行了特征的提取, 因此精细模式法的结果受研究区域范围的影响很小, 方法稳定。

从时空关联的角度分析, 时空相关分析方法和基于数据驱动的多维关联分析方法应用于探索不同要素场在时间和空间上的关联关系。时空相关分析方法基于相关系数进行, 处理两个要素场之间的时空关联。奇异值分解方法和典型相关分析方法在两个要素场之间的空间相关分布的研究中应用十分广泛。作者使用 BP 典型相关分析方法对 1998 年 1 月~2009 年 12 月的海平面异常(SLA)和 115°E~115°W、0°N~50°N 西北太平洋海域的海表温度的时空关联进行了分析, 结果如图 2 所示。

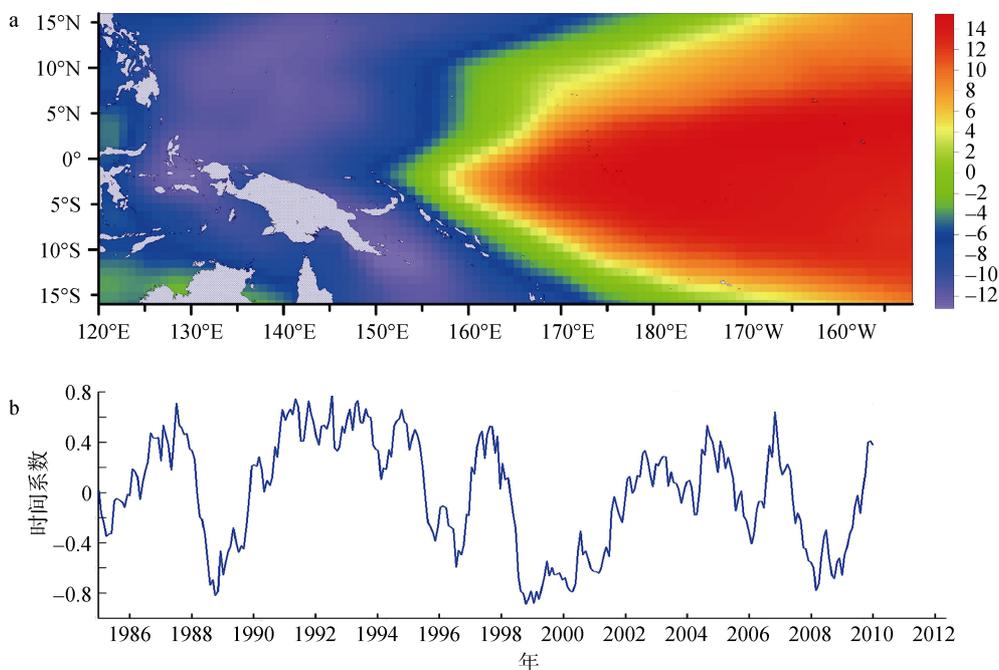


图 1 西太平洋暖池区 SST 异常分布第一模态的空间分布(a)和时间序列(b)

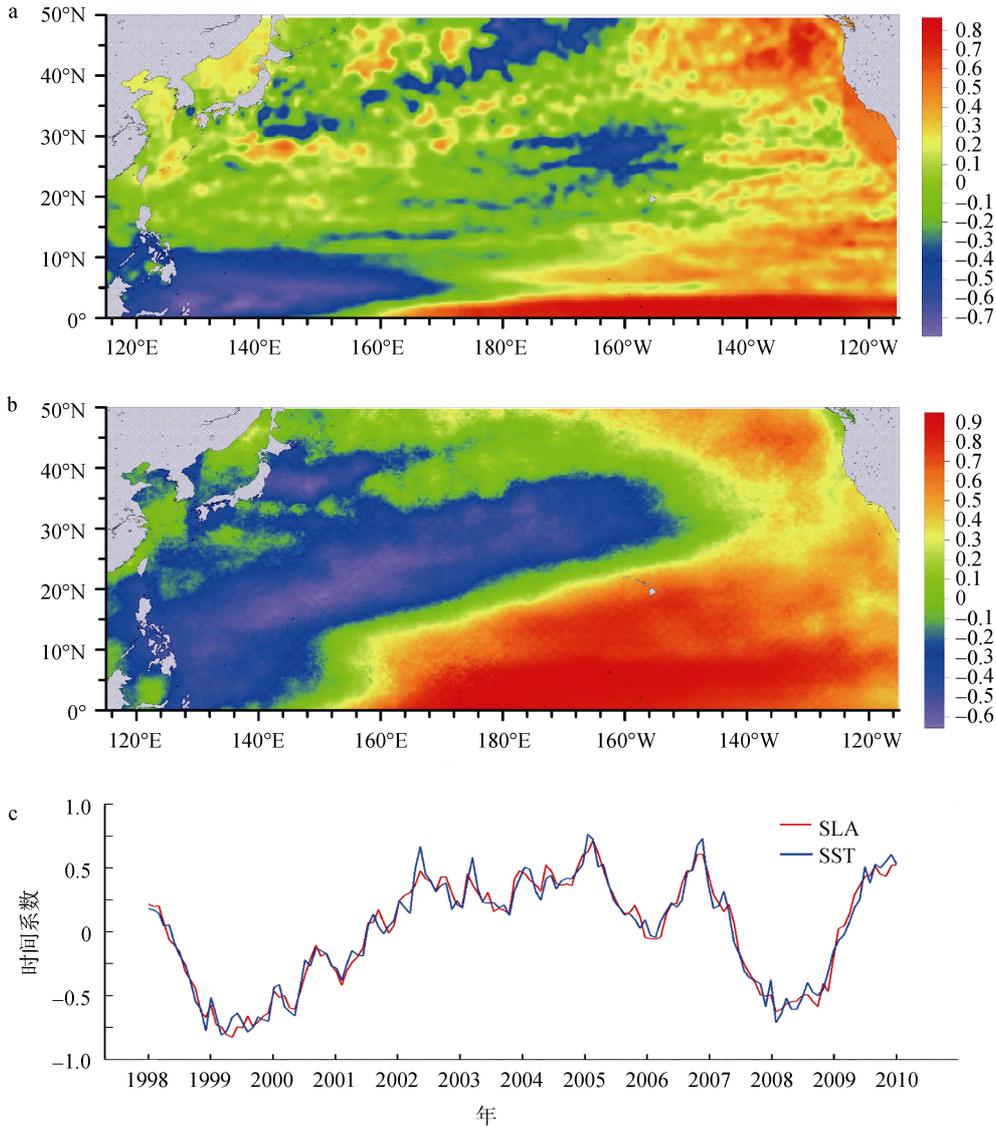


图2 西太平洋(SLA)a 与(SST)b 空间相关分布以及其时间(c)典型变量

BP 典型相关分析方法对两个海洋要素场的分析能获得空间分布和时间序列两个方面的特征,且能清楚地显示两者的空间遥相关,两者的典型变量可用于研究时间规律的变化。图 2 表示在赤道中东部地区的海平面异常和中东部地区的海表温度具有较为强烈的正相关关系。奇异值分析方法使用简便,典型相关分析方法物理意义明确,理论推导严谨,其结果比奇异值分解方法精确,但是这两种方法都只能对两个要素场的时空关联进行分析,很难适用于 3 个及以上的要害场。当分析西北太平洋暖池形成的信风张弛理论的问题时:当信风加强时,暖海水在西太平洋堆积,致使西太平洋海面升高,温跃层加深;而当信风减弱时,在西太平洋堆积起来的暖水

得不到动力支持便以 Kelvin 波的形式回流,使南美沿岸异常增温,形成 El Nino 以及该过程导致的降水分布的变化。该过程包含了海面风场、海表面温度、降雨等多个要素场的时空变化,时空相关分析方法却很难在统一的时空框架下实现上述多个要素场的关联分析。基于数据驱动的多维关联分析方法可以应用于两个及以上要素场的关联分析。数据挖掘的关联规则分析方法在理论上能对无数个要素同时进行关联分析,但需合理选择要素并对其属性进行离散化处理,离散量化的过程会导致属性信息的丢失。案例推理方法也是面向多要素分析的需求而发展的一个技术,案例推理需要大量的数据和案例作为历史案例资源库,且案例的综合表达方法需要根据专业的

知识背景设计,使该资源库具有重复使用的意义。在多个要素场联合分析的要求下,在海洋动力、海气相互作用等物理机制不甚明了的背景下,时空关联规则挖掘和案例推理以其无需先验假设,无要素限制的优势成为今后的发展的趋势之一。

海洋模型是基于海洋物理机制的研究方法,其物理意义最为明确、推导严谨。海洋模式是对物理海洋的一个简化参数的模拟,各有不可替代的特点和优势。在未来发展中,逐渐增加参数的海洋模型会逐步适合更多的海域。海洋观测资料的不断完善和对海洋规律的探索,将不断改进海洋模型,但对于特定的问题,选用合适的海洋模型进行模拟,有助于问题的解决。

不论应用何种方法,作为输入的原始资料都需要处理成方法所适用的输入资料场。不同要素的数据一般来源于不同的平台,数据精度、数据格式、时空尺度、数据质量如数据的不稳定性、偏移量等都存在差异。因此,海量、多源、异质的海洋要素数据的偏移修正^[71]和数据格式的统一^[19]等数据预处理结果的差异将对海洋要素的时空分析结果产生影响。

海洋观测数据处理方法经过了从定性为主到定量为主、从点处理到面处理、从单一要素处理到多重要素处理的发展阶段。本文从数据处理方法的原理和目的出发,对区域海洋要素处理方法进行了归纳分析,指出了各类方法的优点和不足之处。随着对海洋要素变化规律与海洋动力机制探索的需求,未来的海洋观测数据的处理方法主要有以下 4 个方面的发展:

(1) 在数据来源增多、多要素联合分析的情况下,数据的偏移修正和无缝集成等预处理工作将获得更加广泛的关注。

(2) 获得更加精细的时空特征提取方法如精细模式提取法是细致研究某一要素场时空特征的发展趋势之一。

(3) 基于数据驱动的多维关联分析方法以其无需先验假设、无要素限制的优势,在探索海洋规律和多要素时空关联分析方面有独特的优势,是今后发展的一个方向。

(4) 基于模型的数值模拟方法物理意义明确,理论方面需要继续深入。

海洋环境具有时空动态特性和高维(多要素)特性,对地观测海洋数据是海洋现象在时间和空间上的采样,是具有空间、时间、属性 3 个基本特征的时

空数据。海洋观测数据的分析是监测、预报海洋环境,揭示海洋过程规律的前提。从数据场中获取海洋形态特征,建立要素的时间和空间关联关系,才能真正表达海洋现象并揭示海洋过程规律。

参考文献:

- [1] Huffman G J, Adler R F, Bolvin D T, et al. The TRMM multisatellite precipitation analysis(TMPA): Quasi-Global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2006, 7: 38-55.
- [2] 刘俊峰, 陈仁升, 韩春坛, 等. 多卫星遥感降水数据精度评价[J]. *水科学进展*, 2010, 21(3): 343-348.
- [3] McClain E P, Pichel W G, Walton C C. Comparative performance of AVHRR-based multichannel sea surface temperatures[J]. *Geophys Research*, 1985, 90(C6): 11587-11601.
- [4] Ginzburg A I, Kostianoy A G, Sheremet N A. Seasonal and interannual variability of the Black Sea surface temperature as revealed from satellite data(1982-2000) [J]. *Journal of Marine Systems*, 2004, 52: 33-50.
- [5] Pan J Y, Yan X H, Zheng Q A, et al. Interpretation of scatterometer ocean surface wind vector EOFs over the Northwestern Pacific[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 84: 53-68.
- [6] Rasmusson E M, Carpenter T H. Variations in tropical sea surface temperature and surface wind fields associated with the Southern Oscillation/El Nino[J]. *Mon Wea Rev*, 1982, 110: 354-384.
- [7] Reynolds R W, Smith T M. A high-resolution global sea surface temperature climatology[J]. *Climate*, 1995, 8: 1571-1583.
- [8] Chen G, Shao B M, Han Y, et al. Modality of semiannual to multidecadal oscillations in global sea surface temperature variability[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, C03005.
- [9] MacKenzie B R, Schiedek D. Long-term sea surface temperature baselines—time series, spatial covariation and implications for biological processes[J]. *Journal of Marine Systems*, 2007, 68: 405-420.
- [10] Kazmin A S, Zatsepin A G. Long-term variability of surface temperature in the Black Sea, and its connec-

- tion with the large-scale atmospheric forcing[J]. *Journal of Marine Systems*, 2007, 68: 293-301.
- [11] 齐庆华, 张启龙, 侯一筠. 西太平洋暖池和东太平洋暖池变异对 ENSO 的联合影响[J]. *海洋科学进展*, 2008, 26(4): 418-427.
- [12] 张启龙, 翁学传, 侯一筠, 等. 西太平洋暖池表层暖水的纬向运移[J]. *海洋学报*, 2004, 26(1): 33-39.
- [13] 齐庆华, 张启龙, 侯一筠. 西太平洋暖池纬向变异及其对 ENSO 的影响[J]. *海洋与湖沼*, 2008, 39(1): 65-73.
- [14] 张启龙, 翁学传, 程明华. 西太平洋暖池 SST 变异对山东夏季降水的影响[J]. *海洋科学集刊*, 2003, 45: 21-28.
- [15] 陈锦年, 王宏娜, 吕心艳. 西太平洋暖池时空分布特征及其与 ENSO 的关系[J]. *海洋学报*, 2008, 30(1): 10-19.
- [16] 王宏娜, 陈锦年, 吕心艳. 西太平洋暖池海温的时空变化及其在 ENSO 循环中的作用[J]. *海洋与湖沼*, 2009, 40(1): 1-7.
- [17] 陈锦年, 何宜军, 孙树远, 等. 西太平洋暖池变异及其对西太平洋次表层海温场的影响[J]. *海洋学报*, 2002, 24(3): 35-44.
- [18] 黄嘉佑, 李黄. 气象中的谱分析[M]. 北京: 气象出版社, 1984: 144-155.
- [19] 苏奋振, 周成虎, 杨晓梅, 等. 海洋地理信息系统——原理、技术与应用[M]. 北京: 海洋出版社, 2005: 25-27.
- [20] Huang N E, Zheng S, Long S R. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. *Proceedings of the Royal Society*, 1998, 454: 903-995.
- [21] 黄大吉, 赵进平, 苏纪兰. 希尔伯特-黄变换的端点延拓 [J]. *海洋学报*, 2003, 25(1): 1-11.
- [22] Jones J A, Hore P J. The maximum entropy method and fourier transformation compared[J]. *Journal of Magnetic Resonance*, 1991, 92(2): 276-292.
- [23] Weng H Y, Lau K M. Wavelets, period doubling, and time-frequency localization with application to organization of convection over the Tropical Western Pacific[J]. *Journal of the Atmospheric Science*, 1994, 51(17): 2523-2541.
- [24] Meyers S D, Kelly B G, Brien J O. An introduction to wavelet analysis in oceanography and meteorology: with application to the dispersion of Yanai waves[J]. *Monthly Weather Review*, 1993, 121: 2858-2866.
- [25] 陈上及, 马继瑞. 海洋数据处理分析方法及其应用 [M]. 北京: 海洋出版社, 1991: 286-331.
- [26] Kutzbach J E. Empirical eigenvectors of sea-level pressure, surface temperature and precipitation complexes over North America[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1967, 6: 791-802.
- [27] Preisendorfer R W. Principal component analysis in meteorology and oceanography[M]. Amsterdam: Elsevier, 1988.
- [28] von Storch H, Zwiers F W. Statistical analysis in Climate research[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.
- [29] Jolliffe I T. Principal component analysis[M]. New York: Springer, 2002.
- [30] Wilks D S. Statistical methods in the atmospheric sciences [M]. Amsterdam: Academic Press, 2006.
- [31] Hannachi A, Jolliffe I T, Stephenson D B. Empirical orthogonal functions and related techniques in atmospheric science: A review[J]. *International Journal of Climatology*, 2007, 27: 1119-1152.
- [32] Miles T N, He R Y. Temporal and spatial variability of Chl-a and SST on the South Atlantic Bight: Revisiting with cloud-free reconstructions of MODIS satellite imagery[J]. *Continental Shelf Research*, 2010, 30: 1951-1962.
- [33] 杜碧兰, 宋学家. 应用经验正交函数分析预报表层海水温度的方法[J]. *海洋学报*, 1981, 3(1): 14-26.
- [34] 张启龙, 翁学传, 颜延壮. 西太平洋暖池海域 SST 场的时空特征[J]. *海洋与湖沼*, 2001, 32(4): 349-354.
- [35] Chen G. A novel scheme for identifying principal modes in geophysical variability with application to global precipitation[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111: D11103.
- [36] Chen G, Shao B M, Han Y, et al. Modality of semiannual to multidecadal oscillations in global sea surface temperature variability[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115: C03005.

- [37] Chen G, Wang Z Z, Qian C C, et al. Seasonal-to-decadal modes of global sea level variability derived from merged altimeter data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114: 2524-2535.
- [38] Cherry S. Some comments on singular value decomposition analysis [J]. *Journal of Climate*, 1997, 10: 1759-1761.
- [39] Prohaska J T. Technique for analyzing the linear relationships between 2 meteorological fields[J]. *Monthly Weather Review*, 1976, 104(11): 1345-1353.
- [40] Lanzante J R. A rotated eigen analysis of the correlation between 700-mb height and sea surface temperature in the Pacific and Atlantic[J]. *Monthly Weather Review*, 1984, 112: 2270-2280.
- [41] Wallace J M, Smith C, Bvetheron C S. Singular value decomposition of wintertime sea surface temperature and 500-mb height anomalies[J]. *Journal of Climate*, 1992, 5(6): 561-576.
- [42] 魏凤英, 曹鸿兴. 奇异值分解及其在北美陆地气温与我国降水遥相关中的应用[J]. *高原气象*, 1997, 2(16): 174-182.
- [43] Sewell R D, Landman W A. INDO-Pacific relationships in terms of sea-surface temperature variations[J]. *International Journal of Climatology*, 2001, 21: 1515-1528.
- [44] Lau K M, Wu H T. Principal modes of rainfall-SST variability of the Asian summer monsoon: A reassessment of the monsoon-ENSO relationship[J]. *Journal of Climate*, 2000, 4: 2880-2895.
- [45] Barnett T P, Preisendorfer R. Origins and levels of monthly and seasonal forecast skill for United States surface air temperatures determined by canonical correlation analysis [J]. *Monthly Weather Review*, 1987, 115(9): 1825-1850.
- [46] Smith T M, Arkin P A, Sapiano M R P. Reconstruction of near-global annual precipitation using correlations with sea surface temperature and sea level pressure[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2009, 114: D12107.
- [47] Bretherton C S, Smith C, Wallace J M. An intercomparison of methods for finding coupled patterns in climate data[J]. *Journal of Climate*, 1992, 5: 541-560.
- [48] 蒋小平, 钟中, 张金善. 环台湾岛海域冬季水温要素的数值模拟 [J]. *海洋预报*, 2006, 23(3): 51-57.
- [49] 熊伟, 刘必劲, 孙昭晨, 等. 宁波舟山近海三维潮流数值模拟 [J]. *水道港口*, 2011, 32(6): 399-407.
- [50] 于晓杰, 姜安刚, 张学庆, 等. 基于 FVCOM 的渤、黄海 M₂ 分潮的数值模拟 [J]. *中国海洋大学学报*, 2010, 40: 157-161.
- [51] 姚远, 蔡树群, 王盛安. 台湾海洋一次海啸的初步数值模拟[J]. *热带海洋学报*, 28(2): 1-6.
- [52] 黄大吉, 陈宗镛, 苏纪兰. 三维陆架海模式在渤海中的应用[J]. *海洋学报*, 1996, 18(5): 1-13.
- [53] 刘鲁燕. HAMSOM 模式在东海内潮研究中的应用[C]. 青岛: 中国海洋大学, 2010.
- [54] 于庆龙, 王辉, 万莉颖. 南海海表温度时空分布特征的数值模拟[J]. *海洋预报*, 2010, 27(4): 59-66.
- [55] 郑沛楠, 吴德星, 陈学恩, 等. 基于 HYCOM 的风生大洋环流模拟及季节变化分析[J]. *中国海洋大学学报*, 2009, 39(1): 7-12.
- [56] Shchepetkin A F, McWilliams J C. A method for computing horizontal pressure-gradient force in an oceanic model with a nonaligned vertical coordinate [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(C3): 3090.
- [57] Shchepetkin A F, McWilliams J C. The regional ocean modeling system: A split-explicit, free-surface, topography following coordinates ocean model[J]. *Ocean Modelling*, 2005, 9: 437-404.
- [58] Tan P, Steinbach M, Kumar V, et al. Finding spatio-temporal Patterns in earth science data[J]. *Proceedings of the ACM SIGMOD KDD Workshop on Temporal Data Mining*, 2001, 1-12.
- [59] Huang Y P, Kao L J, Sandnes F E. Efficient mining of salinity and temperature association rules from ARGO data [J]. *Expert Systems with Applications*, 2008, 35: 59-68.
- [60] Su F Z, Zhou C H, Lyne V, et al. A data-mining approach to determine the spatio-temporal relationship between environmental factors and fish distribution[J]. *Ecological Modelling*, 2004, 174: 421-431.
- [61] 杜云艳, 周成虎, 邵全琴, 等. 案例推理的地学应用背景和方法[J]. *地球信息科学*, 2002, 1: 98-103.

- [62] Kumar V. Discovery of patterns in global Earth science data using data mining[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2010, 6118.
- [63] Steinbach M, Tan P N, Kumar V. Data mining for the discovery of ocean climate indices[C]. Pennsylvania: The Pennsylvania State University, 2002.
- [64] 苏奋振, 周成虎, 刘宝银, 等. 基于海洋要素时空配置的渔场形成机制发现模型和应用[J]. 海洋学报(中文版), 2002, 24(5): 46-56.
- [65] 柴思跃, 苏奋振, 周成虎. 基于周期表的时空关联规则挖掘方法与实验[J]. 地球信息科学学报, 2011, 13(4): 455-464.
- [66] Lee A J T, Chen Y A, Weng C L. Mining frequent trajectory patterns in spatial-temporal databases[J]. Information Sciences, 2009, 179: 2218-2231.
- [67] Holt A. Understanding environmental and geographical complexities through similarity matching[J]. Complexity International, 2000, 7: 1-16.
- [68] 陈卓奇, 邵全琴, 杨海军, 等. 不同时间尺度的西北太平洋海洋表面温度距平模态对比[J]. 地球信息科学, 2007, 9(2): 31-36.
- [69] North G R. Empirical orthogonal functions and normal modes [J]. Atmosphere Science, 1984, 41: 879-887.
- [70] Monahan A H, Fyfe J C, Ambaum M H P, et al. Empirical orthogonal functions: the medium is the message[J]. Journal of Climate, 2009, 22: 6501-6514.
- [71] Rayner N A, Brohan P, Parker D E, et al. Improved analyses of changes and uncertainties in sea surface temperature measured in situ since the Mid-Nineteenth Century: The HadSST2 Dataset [J]. Journal of Climate, 2005, 19: 446-469.

(本文编辑: 谭雪静)