

# 中国东部海域冬季风场与海浪场的关联特征分析

周媛媛<sup>1,2</sup>, 周林<sup>2\*</sup>, 关皓<sup>3</sup>, 杨波<sup>4</sup>

(1. 解放军 91208 部队, 山东 青岛 266102; 2. 国防科技大学 气象海洋学院, 江苏 南京 211101;  
3. 解放军 61741 部队, 北京 100085; 4. 解放军 92682 部队, 广东 湛江 524001)

**摘要:**利用 WAVEWATCH III 海浪模式模拟的 1993—2011 年中国东部海域 19 a 冬季逐日海浪场资料以及同期 CCMP 逐日风场资料,采用奇异值分解(SVD)的方法分析了冬季中国东部海域海浪场与提前 0~5 d 的东亚大陆地面风场的关联特征。结果发现:海浪场与提前 1 d 的地面风场的关联更有意义;SVD 第一模态和第二模态分别反映了贝加尔湖以东南下的反气旋式偏北扰动大风(或气旋式偏南扰动大风)和中国东部平原入海的气旋式扰动风场(或反气旋式扰动风场)对中国东部海域海浪的扰动影响。此外,SVD 分析还揭示了冬季影响中国东部海域海浪的大风关键区和移动路径;随着时间的推移,大风关键区从贝加尔湖以东逐步由蒙古南下影响中国东北和华北地区,最后到达中国东部海域。

**关键词:**中国东部海域;风场;海浪场;SVD 分析

**中图分类号:**P732.6

**文献标识码:**A

**文章编号:**1671-6647(2020)01-0060-10

**doi:** 10.3969/j.issn.1671-6647.2020.01.007

**引用格式:**ZHOU Y Y, ZHOU L, GUAN H, et al. Analysis of the correlation between the daily wind field and wave field in winter in the East China Sea[J]. Advances in Marine Science, 2020, 38(1): 60-69. 周媛媛, 周林, 关皓, 等. 中国东部海域冬季风场与海浪场的关联特征分析[J]. 海洋科学进展, 2020, 38(1): 60-69.

冷空气大风是影响中国东部海域海浪场的主要灾害性天气<sup>[1-2]</sup>。研究表明<sup>[3]</sup>,东亚大陆西北路、东路和西路冷空气引起中国东部海域海上大风几率分别为 61%, 26% 和 13%。冬季是中国东部海域一年中风浪最大、破坏性最强的季节,已有研究表明<sup>[4-7]</sup>,中国东部海域冬季海浪主要受东亚大陆强冷空气和大风的影响,东海和台湾海峡受其影响最大,大浪区一般出现在冷锋或气旋过境后数小时内。

以往研究大多从个例的角度探讨冬季冷空气对中国东部海域海浪的影响,较少从冬季平均状态关注风场与海浪场的关联。为进一步研究冬季中国东部海域海浪的发生、发展与低层风场的关系,本文将利用奇异值分解(Singular Value Decomposition, SVD)方法分析冬季提前 0~5 d 的东亚大陆地面风场与中国东部海域海浪的关系,以期发现前期地面风场与中国东部海域的海浪关系密切的作用时间、关键区以及演变规律,为中国东部海域的海浪预报寻找一些强信号因子。

## 1 研究方法和数据来源

### 1.1 研究方法

SVD 法是一种寻找 2 组变量线性组合的方法,是分析 2 个要素场相关性的常用有效工具<sup>[4-5]</sup>。由于

收稿日期:2018-07-19

资助项目:国家自然科学基金项目——高风速下拖曳系数的衰减程度及其对台风浪模拟的影响研究(41106014)

作者简介:周媛媛(1991-),女,硕士,主要从事海洋水文气象保障方面研究。E-mail: 284095260@qq.com

\* 通讯作者:周林(1963-),男,教授,硕士,主要从事海气相互作用方面研究。E-mail: zhou\_lin4458@sohu.com

(王燕 编辑)

SVD 方法是以两要素场之间的最大协方差为基础展开计算的,故每对 SVD 模态反映的是对应要素的扰动场变化。利用 SVD 方法既可以对 2 个标量气象要素场(如气温、降水量或位势高度)进行诊断分析<sup>[6-8]</sup>,也可以对包含向量场(如风场)的两要素场进行奇异值分解<sup>[9-10]</sup>,本文探讨风场与海浪场的关联,故采用王盘兴等<sup>[9-10]</sup>提出的向量 SVD 方法。

## 1.2 数据来源

风场数据截取于 1993—2011 年 19 a 冬季(前一年 12 月至次年 2 月共 57 个月)逐日的 CCMP(Cross Calibrated Multi-Platform)全球风场<sup>[11-12]</sup>资料,其水平空间范围为  $100^{\circ}\sim 130^{\circ}\text{E}$ ,  $20^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$ (图 1a),水平分辨率取  $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ 。

海浪数据来自 WAVEWATCH III 海浪模式模拟的与上述风场同一时间段的 19 a 冬季逐日中国东部海域有效波高资料。资料的水平空间范围为  $117^{\circ}30'\sim 129^{\circ}00'\text{E}$ ,  $22^{\circ}\sim 41^{\circ}\text{N}$ (图 1b),水平分辨率为  $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ 。该资料已和 Jason 系列卫星高度计资料进行过全面检验,本研究海区模拟波高与实测波高的相关系数大于 0.7,平均相对误差小于 18.5%。具体的数值模拟过程、参数设置以及模拟结果检验见周媛媛等<sup>[13]</sup>,在此不再赘述。

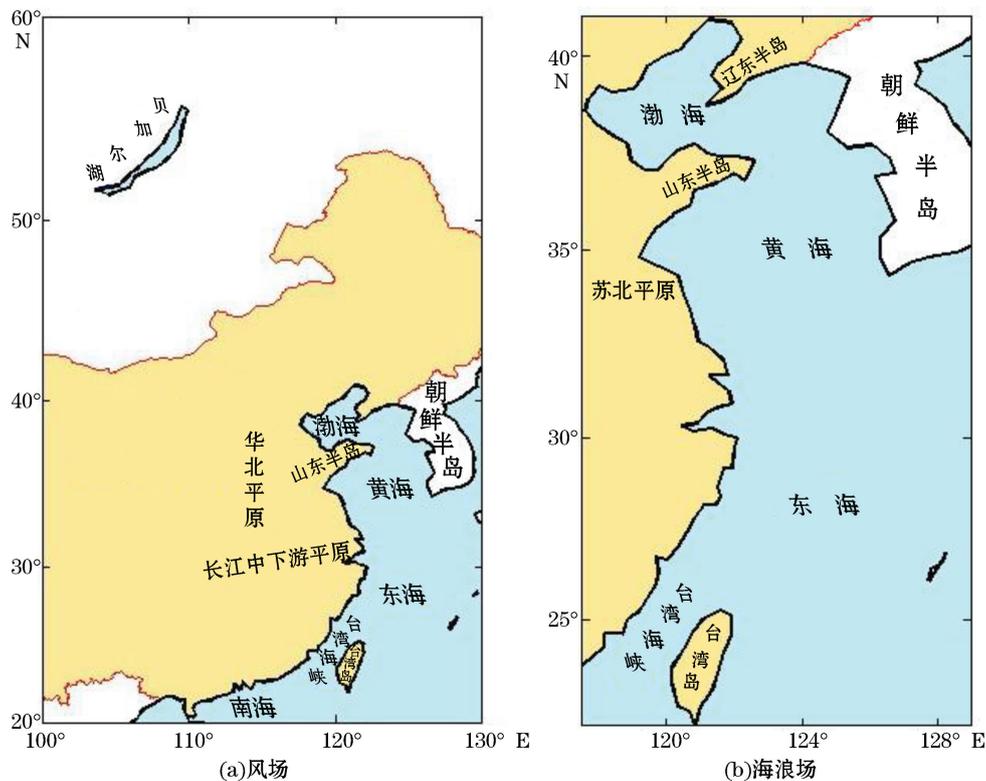


图 1 研究区域

Fig.1 Study area

本文奇异值分解中,设风场变量场为右场,海浪变量场为左场。右场数据是由原始风场分解为  $u$  和  $v$  分量进行日平均后通过标准化处理所得,样本数目为 9 882,时次为 1 710。左场数据由模拟的有效波高日平均后通过标准化处理所得,去除陆点后样本数目为 616,时次为 1 710(为保证数据量的一致性,无论在闰年还是平年,每年 2 月均只取前 28 d 的数据,每天一组数据)。

为了研究风场与海浪场的滞后相关性,分别提取与海浪场同时次的风场、比海浪场提前 1~5 d 的风场共 6 组数据,分别对其与海浪场进行 SVD 分解,对比分析其关键区域和相关性最大日期。

## 2 结果分析

### 2.1 度量参数分析

将进行 SVD 的 6 组数据分别命名为 SVD0~SVD5,其分别对应海浪场与提前 0~5 d 的风场数据。将 SVD0~SVD5 各组数据奇异值分解后前三模态对应的奇异值、协方差平方贡献率和时间序列相关系数列表比较(表 1),可以看出,每组数据中的奇异值和协方差平方贡献率均呈随模态顺序增长而减小的趋势,且第一模态远大于其余 2 个模态,说明各组的第一模态在描述原始的 2 个标准化场中具有特别重要的意义。由于各组的协方差平方贡献率的第一模态和第二模态所占比重较大(二者之和均大于 90%),因此,本文在做典型变量场总体相关分析时,重点关注前 2 个模态。从时间序列相关系数来看,每组数据的相关系数(均通过 1% 的显著性水平检验)随模态顺序增长呈现递减趋势,但变化幅度较小,说明在同一组数据中,虽然相关性随模态减小,但差别并不大,因此,在讨论异类相关系数时,重点关注各组的第一模态。

从各组数据的第一模态中可知,奇异值和相关系数均为  $SVD1 > SVD0 > SVD2 > SVD3 > SVD4 > SVD5$ ,即提前 1 d 的第一模态的相关系数最大(0.75),SVD0 第一模态(0.73)略小于 SVD1 第二模态(0.74);协方差平方贡献率则是  $SVD0 > SVD1 > SVD2 > SVD3 > SVD4 > SVD5$ ,其减小的幅度也较小,说明在 6 组数据中,SVD0 和 SVD1 是相关性最强的 2 组数据,即:在本文中研究的区域内,海浪场与同时次的风场及提前 1 d 的风场相关性最大。但从海浪预报的角度看,提前 1 d 的地面风场分布和变化更具有实际意义。

表 1 奇异值分解度量参数表  
Table 1 Metric parameters of SVD

数据组名称	奇异值			协方差平方贡献率/%			相关系数		
	第一模态	第二模态	第三模态	第一模态	第二模态	第三模态	第一模态	第二模态	第三模态
SVD0	502.691	204.397	92.620	81.60	13.49	2.77	0.73	0.67	0.63
SVD1	518.979	241.235	124.471	76.75	16.58	4.41	0.75	0.74	0.69
SVD2	389.711	196.684	105.415	73.47	18.71	5.38	0.65	0.58	0.54
SVD3	264.141	132.077	68.809	73.44	18.36	4.98	0.53	0.41	0.33
SVD4	174.711	91.164	48.593	71.01	19.33	5.49	0.38	0.31	0.27
SVD5	123.349	73.541	42.123	64.98	23.10	7.58	0.29	0.25	0.25

### 2.2 典型变量场总体相关分析

由于 SVD0 和 SVD1 是相关性最强(在表 1 中奇异值、协方差平方贡献率和相关系数均为最大或次大)的 2 组数据,且 SVD1 第一和第二模态的相关系数(0.75 和 0.74)分别大于 SVD0 的第一、第二模态的相关系数(0.73 和 0.67),故本文重点分析提前 1 d 和同时次的风场与海浪场的奇异向量空间分布和时间系数曲线,探究它们的典型变量场总体相关状况。

提前 1 d 低层风场与海浪场的 SVD 奇异向量空间分布和时间系数曲线的第一、第二模态见图 2 和图 3。由 SVD1 第一模态(图 2)可见:风场(右奇异向量,图 2a)在贝加尔湖以东大陆呈一反气旋辐散气流覆盖,风速大值区位于中国渤海、黄海和东北北部,东海南部尤其台湾岛以东风速相对较小,整个海区风向几乎为一致的西北风。海区浪场的特征向量(左奇异向量,图 2b)均为正值,海浪大值区和大风区对应较好,大值区主要位于朝鲜半岛以南海域和台湾海峡,海岸附近波高等值线与海岸线平行,梯度较大。第一模态的模态相关系数为 0.75,反映了第一模态左场(浪高)、右场(风场)有很好的总体相关性。与对应时间系数相结合,当时

间系数为正值时,该模态主要表征了位于大陆的反气旋式扰动风场对中国东部海域海浪的影响,使东部海区海浪波高扰动相对增加。当时间系数为负值时,该模态主要表征了位于大陆的气旋式扰动风场对中国东部海域海浪的影响,由于海上扰动风场为偏南风,与冬季盛行偏北风反向,使东部海区海浪波高扰动相对减小。

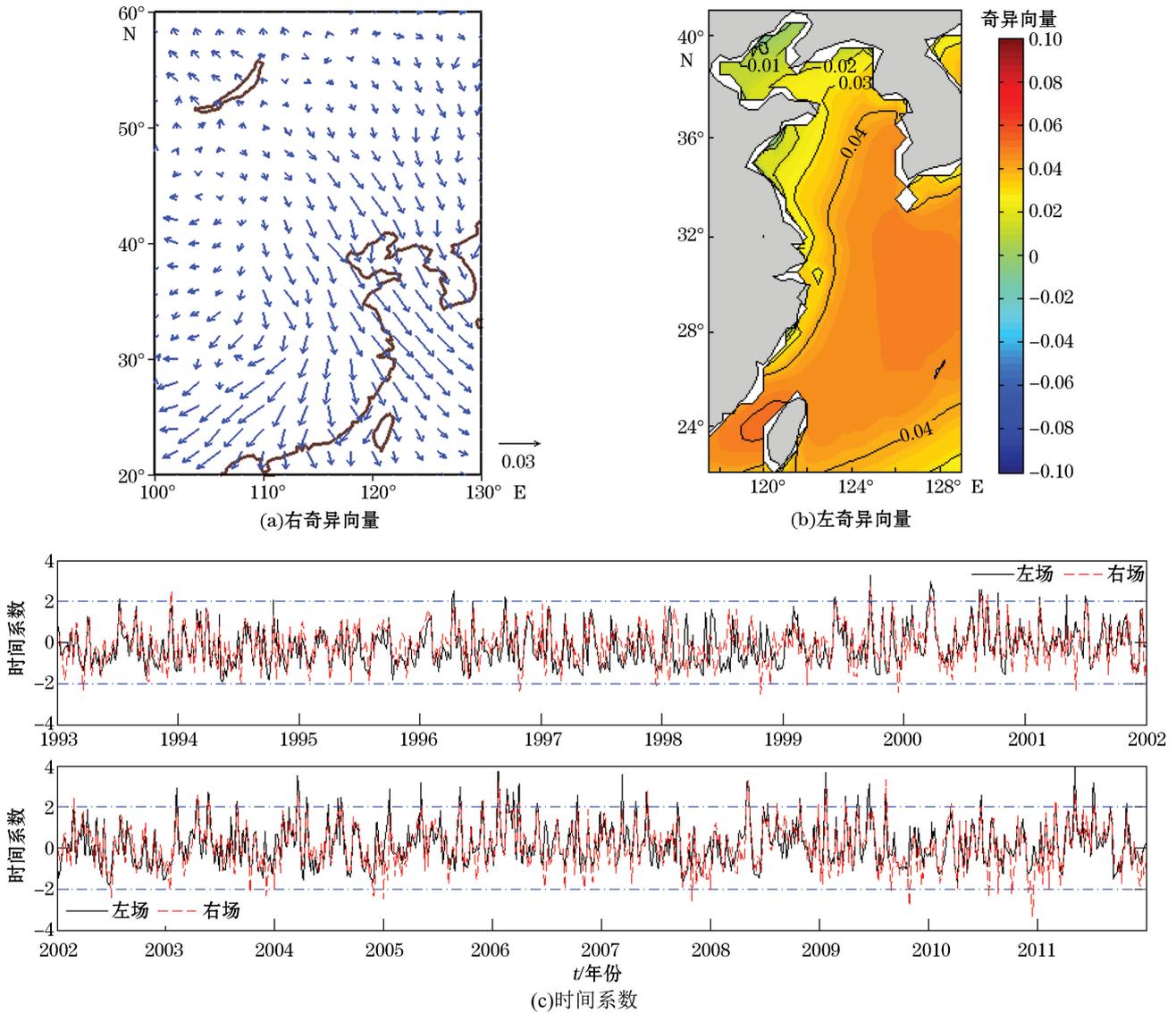


图 2 SVD1 第一模态的奇异向量空间分布和时间系数曲线

Fig.2 Space distribution and time coefficient of the first mode of SVD1

由 SVD1 第二模态(图 3)可见,影响海区的风场(图 3a)是一个中心位于中国苏北平原(华北平原南端)东南部附近的反气旋扰动。受该反气旋辐散气流扰动影响,东海南部、台湾海峡、台湾岛以东洋面扰动风速较大,黄海和渤海风速较小,尤以反气旋扰动的涡旋中心附近的黄海中南部风速最小。与风场相对应的海浪场特征向量(图 3b)的分布呈现以东海中部 SW—NE 走向零值线为界南北反相的变化;海浪场特征向量的大值区分布在南部的台湾海峡和南海北部以及北部的山东半岛周边海域。该分布型态和右场(风场)有较好的对应,第二模态的模态相关系数为 0.74,亦即海浪场和风场时间系数随时间基本同步变化。结合第二模态的时间系数(图 3c)可见,SVD1 第二模态反映中国东部海域海浪场和风场的一种扰动模态,即中国东部海域的海浪受到苏北平原入海的反气旋(或气旋)扰动气流的影响。当时间系数大于零时,反气旋扰动风场增强,

东海南部偏北扰动风速加大,风向与冬季盛行风(或背景风)风向一致,故波高扰动为正;而渤、黄海扰动风场风向与冬季盛行风向相反,故波高扰动为负。当时间系数为负值时,海域为气旋式扰动风场,东海南部偏南风扰动风速增大,风向与冬季盛行风(或背景风)风向相反,故波高扰动为负,而渤、黄海扰动风场风向与冬季盛行风向相同,故波高扰动为正。该模态主要反映了位于中国东部平原(华北平原和长江中下游平原附近)入海的大尺度气旋(或反气旋)扰动风场对中国东部海域海浪扰动的影响。

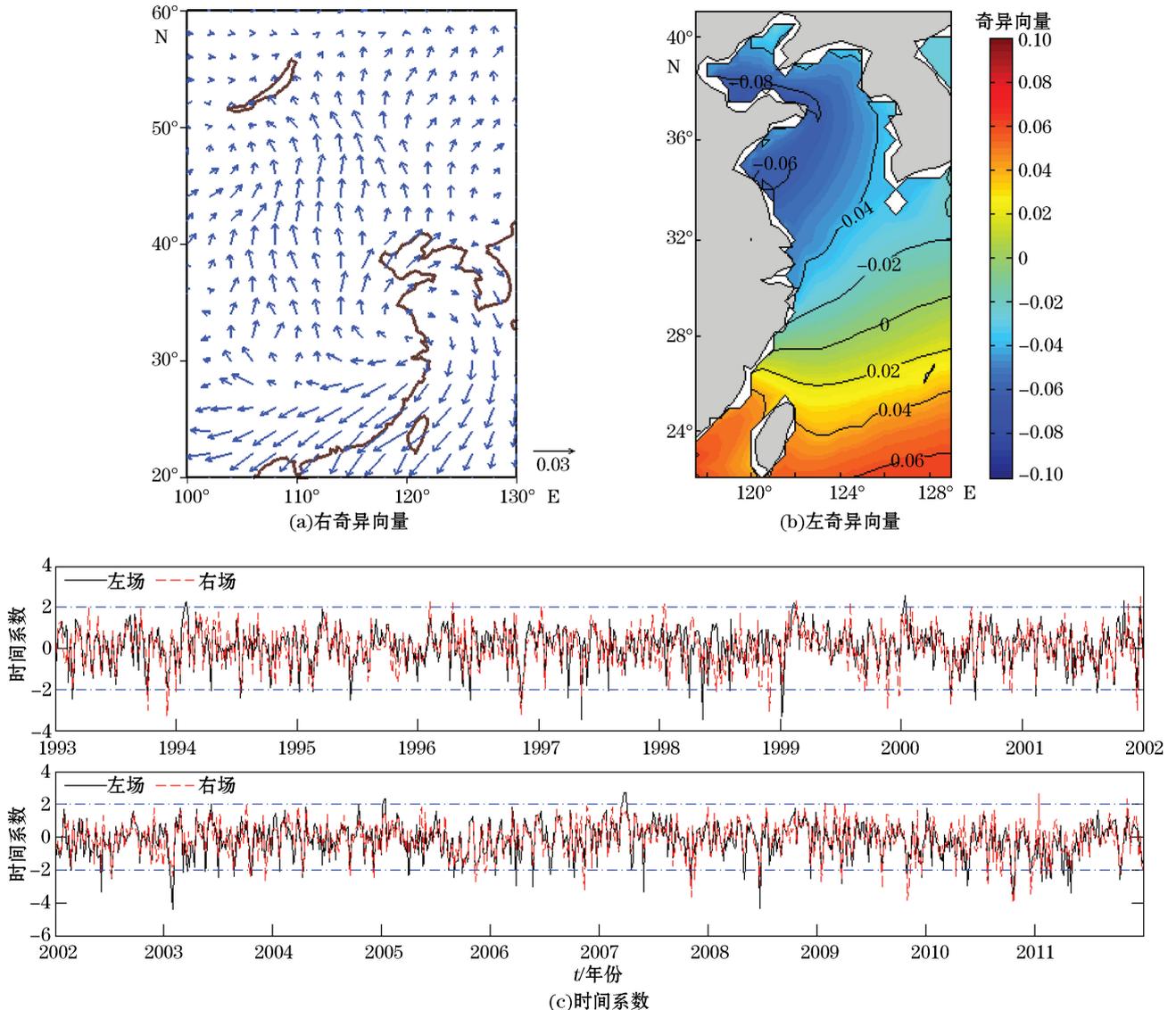


图3 SVD1第二模态的奇异向量空间分布和时间系数曲线

Fig.3 Space distribution and time coefficient of the second mode of SVD1

同时次的 SVD0 奇异向量空间分布和时间系数曲线的第一、第二模态见图 4 和图 5。由图 4、图 5 与图 2、图 3 对比可以发现, SVD0 和 SVD1 的第一模态与第二模态均十分相似。由 SVD0 第一模态(图 4)可见, 随着贝加尔湖以东反气旋扰动的南下, 海区偏北大风扰动区也向南移动并覆盖整个中国东部海域, 海区浪场的特征向量在朝鲜半岛西部和东海北部形成闭合高中心; 而 SVD0 第二模态(图 5)则反映出前一天中心位于中国苏北平原的反气旋扰动东移至朝鲜半岛南部, 研究海区受其后半部影响, 海区浪高仍存在南北反相的变化。第一模态(图 4c)的模式相关系数为 0.73, 它和 SVD1 第一模态(图 2c)相关系数也十分相似。从第一

模态时间系数的逐年变化来看,1999年前冬季逐日振幅相对较小,海浪场6个时次、风场4个时次超过2.0,1999年后时间系数的振幅明显变大,海浪场71个时次、风场38个时次超过2.0,特别是在2004年、2006年、2008年、2009年和2011年冬季,有些天时间系数有长长的拖尾现象,振幅接近4.0,这反映1999年后该区域风场风速和浪场波高扰动变化比1999年前剧烈。第二模态(图5c)的模态相关系数为0.67,也和SVD1第二模态(图3c)相关系数相似;比较第二模态的时间系数的逐年变化,可以发现时间系数有较明显的负拖尾现象,即海浪场66个时次、风场54个时次时间系数小于-2.0,对比时间系数大于2.0的海浪场和风场分别有20和27个时次,意味着该海域冬季常发生由东部平原入海的气旋式扰动,造成黄海和渤海扰动波高增加,东海南部海域波高减小的扰动现象。

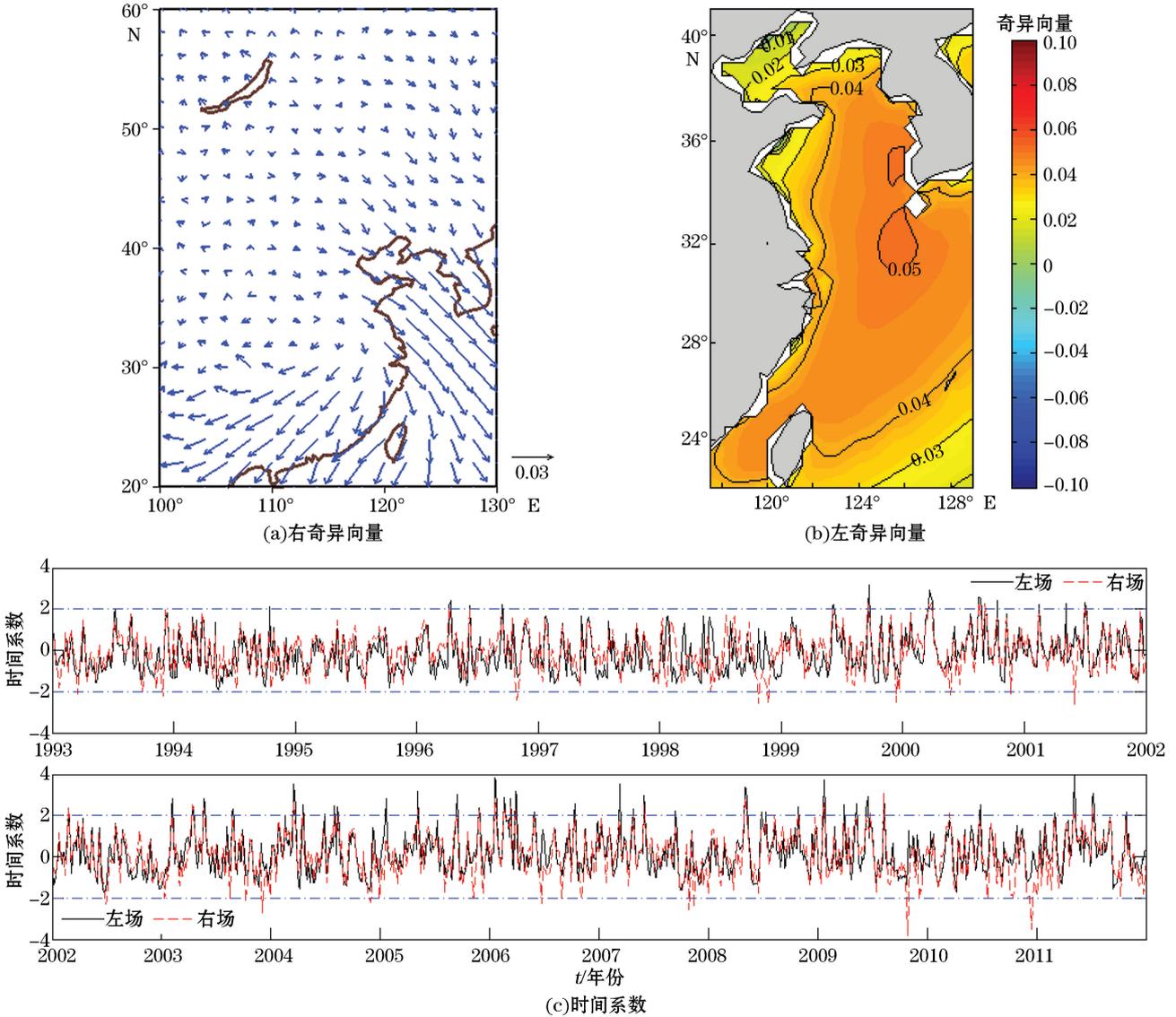


图4 SVD0第一模态的奇异向量空间分布和时间系数曲线  
 Fig.4 Space distribution and time coefficient of the first mode of SVD0

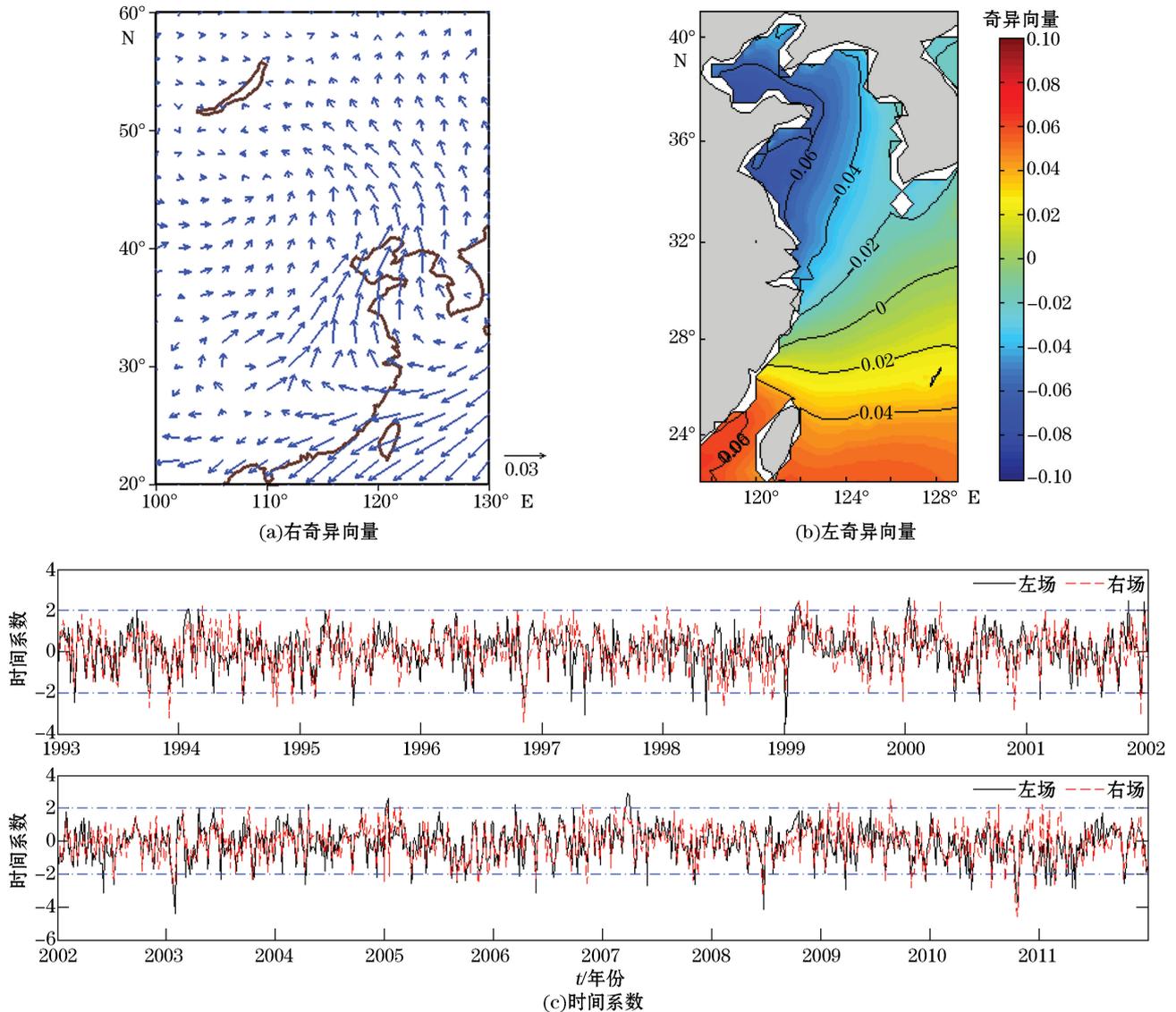


图5 SVD0 第二模态的奇异向量空间分布和时间系数曲线

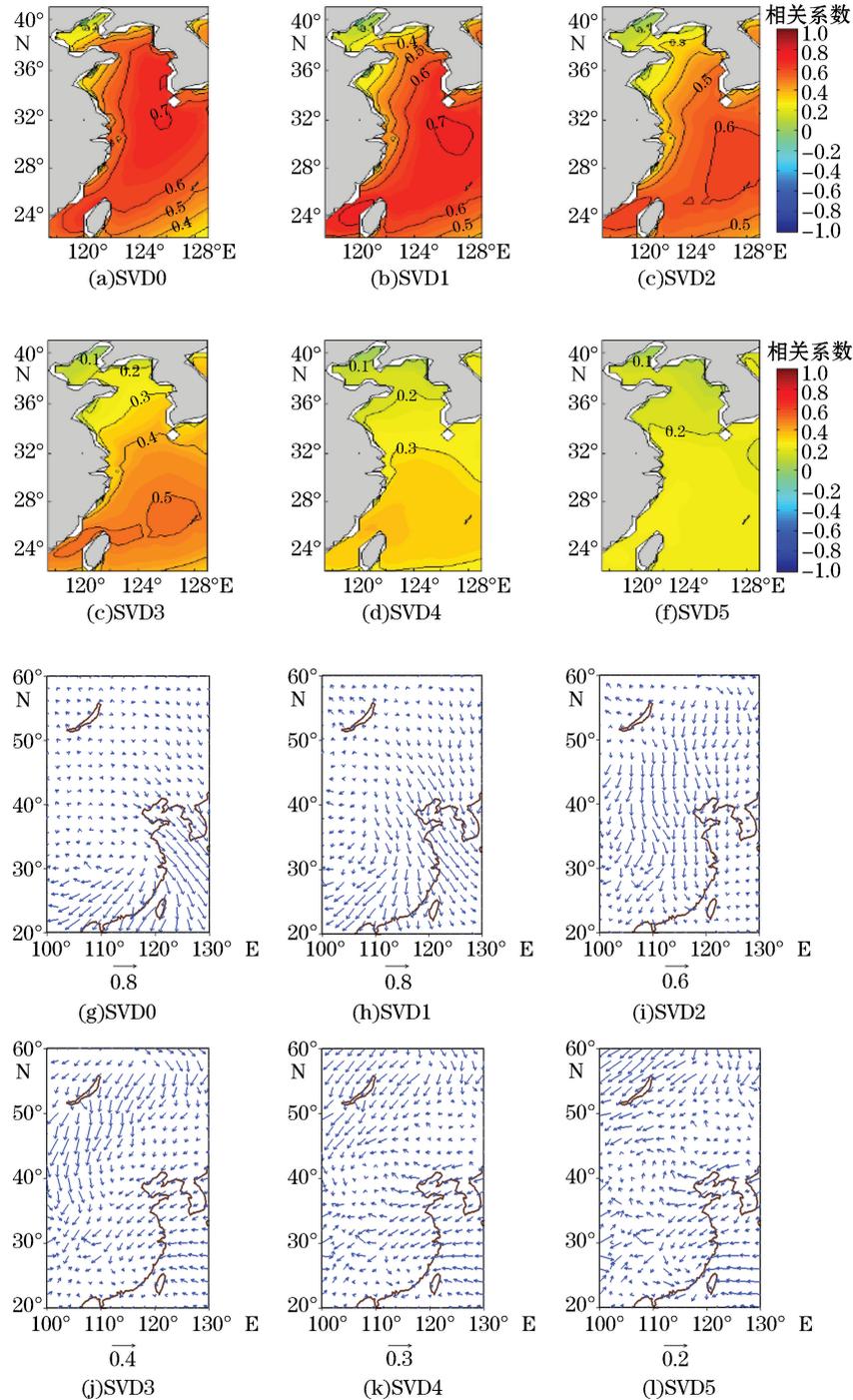
Fig.5 Space distribution and time coefficient of the second mode of SVD0

### 2.3 风场影响海浪场的关键区分析

SVD的异类相关系数分布型代表了两变量场相互关系的分布结构,分析异类相关系数场可以寻找一个场对另一个场相互影响的关键区。图6a~图6l分别为当天至提前5d的异类相关系数场的第一模态。

由图6可知,当天(图6a和图6g)影响海区浪场的扰动风场关键区(大值偏北风)主要位于海区的海面,海浪场的大部分海域的相关系数均超过0.5,最大值大于0.7,位于黄海南部和东海北部;提前1d时(图6b和图6h)扰动风场关键区向中国渤海北部北上,海浪场的相关系数场和同时次的相似,大值区整体略有南移,大于0.7的高值区范围有所扩大,除东海北部外,台湾海峡也出现大于0.7的高值区;提前2d时(图6c和图6i)扰动风场关键区已移至内蒙古、蒙古和中国东北平原西部,海浪场的相关系数场分布形态和前一天相似,但相关系数减小,大于0.6的高值区位于东海和台湾海峡;提前3d时(图6d和图6j)扰动风场关键区已移到贝加尔湖以东以及蒙古国附近,海浪场的相关系数场大值区继续南移并减小,大于0.5的高值闭合区

位于台湾海峡和台湾岛东北部海域;提前 4 d 和 5 d 时,扰动风场(图 6k 和图 6l)关键区已移到贝加尔湖以北和西北附近,而海浪场(图 6e 和图 6f)的相关系数场闭合大值区已消失,海域最大相关系数分别不超过 0.4 和 0.3,且提前 4 d 和 5 d 的第一模态相关系数仅为 0.38 和 0.29(表 1),所以对于影响中国冬季中国东部海域海浪的大风的关键区可以提前 3 d 出现在贝加尔湖东南以及蒙古国附近,并随着时间的临近通过偏北风逐步由蒙古、内蒙古南下影响我国东北和华北,最后到达中国东部海域,影响关系最密切的海区为东海和台湾海峡。



注:图 a~图 f 分别为 SVD0~SVD5 第一模态的左异类相关系数;图 g~图 l 分别为 SVD0~SVD5 第一模态的右异类相关系数

图 6 异类相关系数场

Fig.6 Heterogeneous correlation coefficient field for SVD0~SVD5

### 3 结 论

通过对数值模拟的 1993—2011 年中国东部海域 19 a 冬季逐日海浪场与提前 0~5 d 的东亚大陆地面风场进行 SVD 分析,探究冬季逐日风场与海浪场的关联,找寻地面风场对海浪场的作用时间、关键区以及演变规律,得到结论:

1) SVD 分析揭示了冬季提前 0~5 d 的逐日地面风场变化与海浪场变化有显著的联系,尤其是提前 1 d 的风场与海浪场的关联更有意义。

2) SVD 第一模态反映了来自贝加尔湖以东反气旋(或气旋)式扰动南下的偏北(偏南)扰动大风对海面浪场波高扰动的影响;第二模态代表中国东部平原入海的气旋式(占多数)或反气旋式(占少数)扰动风场对中国东部海域海浪波高扰动的影响。1999 年后研究区域的风速和浪高扰动变化比 1999 年前剧烈。

3) SVD 分析揭示出冬季影响中国东部海域海浪的扰动大风关键区可以提前 3 d 出现在贝加尔湖以东以及蒙古国附近,并随着时间的临近通过偏北风逐步由蒙古、内蒙古南下影响中国东北和华北,最后到达中国东部海域,影响关系最密切的海区为东海和台湾海峡。

#### 参考文献(References):

- [1] WANG Y N, WANG Q Y, LIU B X. The ensemble wave forecast and test of cold air wave by using SWAN model in the Bohai Sea and the Yellow Sea[J]. Haiyang Xuebao, 2015, 37(9): 10-16. 王亚男, 王庆元, 刘彬贤. 黄、渤海冷空气海浪场的集合预报试验[J]. 海洋学报, 2015, 37(9): 10-16.
- [2] XU F X. Spatial and temporal distribution of the disastrous wave over ocean area near China[J]. Haiyang Xuebao, 1996, 18(2): 26-37. 许富祥. 中国近海及其邻近海域灾害性海浪的时空分布[J]. 海洋学报, 1996, 18(2): 26-37.
- [3] XIN B H. The generality of gale in Bohai Sea and Yellow Sea[M]. Beijing: Meteorology Press, 1991: 41. 辛宝恒. 黄海渤海大风概论[M]. 北京: 气象出版社, 1991: 41.
- [4] PROHASKA J. A technique for analyzing the linear relationships between two meteorological fields[J]. Monthly Weather Review, 1976, 104: 1345-1353.
- [5] WEI F Y. Modern climatic statistical diagnosis and prediction technology[M]. Beijing: Meteorology Press, 1999: 173-178. 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 1999: 173-178.
- [6] FENG X, WANG X, WANG Y. Anomalies of the northeast China floods season precipitation and SVD analysis with SSTA in world oceans[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2006, 22(4): 367-373. 冯新, 王新, 王元. 东北地区汛期降水与全球大洋海温异常关系的 SVD 分析[J]. 热带气象学报, 2006, 22(4): 367-373.
- [7] MA H, CHEN Z H, JIANG L P, et al. SVD analysis between the annually first raining period precipitation in the south of China and the SST over offshore waters in China[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2009, 25(2): 241-245. 马慧, 陈桢华, 姜丽萍, 等. 华南前汛期降水与我国近海海温的 SVD 分析[J]. 热带气象学报, 2009, 25(2): 241-245.
- [8] WEI F, DING Y G, YANG J H, et al. SVD analysis of the relationship between 500 hPa height fields and precipitation field in rainy season in Northwest China[J]. Arid Meteorology, 2005, 23(4): 17-23. 魏锋, 丁裕国, 杨金虎, 等. 中国西北地区雨季降水与 500hPa 高度场的 SVD 分析[J]. 干旱气象, 2005, 23(4): 17-23.
- [9] WANG P X, ZHOU W C, WANG X, et al. SVD for meteorological vector fields with its applications[J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 1997, 20(2): 152-157. 王盘兴, 周伟灿, 王欣, 等. 气象向量场奇异值分解方法及其应用[J]. 南京气象学院学报, 1997, 20(2): 152-157.
- [10] WANG P X, ZHOU W C, XUE Z H, et al. Singular value decomposition of interannual anomalies of wind stress and sea surface temperature in the equatorial pacific area[J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 1998, 9(3): 265-272. 王盘兴, 周伟灿, 薛志华, 等. 赤道太平洋区域风应力与海面温度年际异常的奇异值分解[J]. 应用气象学报, 1998, 9(3): 265-272.
- [11] ATLAS R, HOFFMAN R N, ARDIZZONE J, et al. A cross-calibrated, multiplatform ocean surface wind velocity product for meteorological and oceanographic applications[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2011, 92(2): 157-174.
- [12] WANG H, SUI W H. Seasonal variation analysis of sea surface winds in China sea areas with CCMP wind field data[J]. Meteorological Science and Technology, 2013, 41(4): 720-725. 王慧, 隋伟辉. 基于 CCMP 风场的中国近海 18 个海区海面大风季节变化特征分析[J].

气象科技, 2013, 41(4): 720-725.

- [13] ZHOU Y Y, ZHOU L, GUAN H, et al. Verification of wave simulation results based on Jason-1 and Jason-2 data in the East China Sea [J]. *Marine Forecasts*, 2018, 35(6): 40-47. 周媛媛, 周林, 关皓, 等. 基于 Jason-1 和 Jason-2 卫星资料的中国东部海域海浪模拟结果的检验[J]. *海洋预报*, 2018, 35(6): 40-47.

## Analysis of the Correlation Between the Daily Wind Field and Wave Field in Winter in the East China Sea

ZHOU Yuan-yuan<sup>1,2</sup>, ZHOU Lin<sup>2</sup>, GUAN Hao<sup>3</sup>, YANG Bo<sup>4</sup>

(1. *Army 91208 of PLA, Qingdao 266102, China;*

2. *School of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology, Nanjing 211101, China;*

3. *Army 61741 of PLA, Beijing 100085, China;*

4. *Army 92682 of PLA, Zhanjiang 524001, China)*

**Abstract:** Using the daily wave field simulated by WAVEWATCH III and daily wind field of CCMP in the East China Sea from 1993 to 2011, we analyzed the correlation between the two fields from zero to five days led by wind with the SVD method. Analysis shows that the correlation with one day lead by wind is more meaningful. The first two modes of SVD reflects how the anticyclonic northerly (or cyclonic southerly) perturbation gale from the Lake Baikal and the cyclone (or anticyclone) perturbation moving eastward into the sea affect the wave field. The analysis also reveals the key areas and moving paths of strong winds affecting the waves in the East China Sea in winter. The key area moves from the east of Lake Baikal to Mongolia, then further moves to Northeast and North China, and finally reaches the East China Sea.

**Key words:** the East China Sea; wind field; wave field; SVD analysis

**Received:** July 19, 2018