

时间域混合像元分析在海冰密集度变化研究中的应用

毕海波^{1,2}, 李双双^{3*}

1. 中国科学院研究生院, 北京 100049
2. 中国科学院遥感应用研究所, 北京 100101
3. 中国人民大学信息学院, 北京 100872

摘要 传统意义混合像元分析方法是对有不同光谱特征的地物进行分解(spectral mixture analysis, SMA), 得到各个组分在该像元内所占的百分数。而将光谱域的混合像元分析延伸至时间域内(temporal mixture analysis, TMA), 提取的表征时间特性的端元用于像元分解所得残差小于8.5%, 说明TMA提取南极地区海冰密集度时间变化特性具有可行性。将获取的多年平均端元用于2005年和2010年海冰密集度数据, 得到残差分别为(1.4±2.42)%和(1.7±2.87)%, 高于多年平均残差精度(1±1.53)%, 在一定程度上反映某年海冰密集度数据相对多年平均值的变化。因此, TMA为全球变暖背景下的海冰密集度的时空特性研究提供了新思路。

关键词 海冰密集度; 南极; TMA; AMSR-E; SMACC; 被动微波遥感

中图分类号: P76 **文献标识码**: A **DOI**: 10.3964/j.issn.1000-0593(2012)04-1032-06

引言

极地海冰覆盖在保持地表热量平衡方面有着重要作用。一方面因其相对于海水具有较高的反照率, 能反射较多太阳能; 另一方面海冰作为地球表面的保护层, 减少海水和大气的热量交换。海冰密集度是指单位面积内海冰覆盖占得比例, 它对研究局部及全球变化有重要意义^[1,2]。

从20世纪70年代开始, 遥感技术特别是微波遥感开始在海冰监测中发挥重要的作用。相对于易受光线变化和云覆盖影响的光学遥感而言, 微波遥感可以全天时、全天候的工作, 其穿透云层和不受光照条件影响使其在极地海冰研究中占据主导地位。虽然各种高分辨率雷达数据已应用于海冰监测研究, 但其较窄的幅宽、较长的回归周期及昂贵的费用限制其广泛应用。相比之下, 被动微波遥感数据, 如SSM/I^[3-5], AMSR-E^[3,6]等数据, 费用低, 周期短, 特别是搭载在Aqua上的AMSR-E以其6 km的空间分辨率(SSM/I约为12 km)和每天一次的高时间分辨率在海冰时空变化研究中发挥了重要作用。

混合像元的存在是影响识别分类精度的主要因素之一, 遥感动态监测工作中, 经常遇到混合像元的难题, 解决这一

问题的关键在于通过一定方法找出组成混合像元的各种典型地物的比例。传统意义混合像元是指在一个像元内存在有不同光谱类型的地物。本工作将光谱域的混合像元分析应用到时间域, 认为混合像元是由不同海冰密集度随时间变化类型构成的混合像元。利用SMACC提取了表征多年平均海冰密集度随时间变化端元波谱曲线, 为研究海冰密集度的季节变化提供了新的途径。虽然Piwowar^[7,8]利用TMA获取了北极不同类型的多年平均海冰密集度随时间变化的端元波谱曲线。但其提取方法效率低, 利用线性方程进行混合像元分解端元选取数目受使用数据的波段数的限制, 且交互式的方法使得结果受到人为因素干扰, 另外其所使用卫星数据(SSM/I)空间分辨率也偏低, 对纯净单一地表覆盖类型构成的纯净像元(端元)的寻找会产生影响。针对上述缺陷, 本工作借助最新算法ASI反演得到高空间分辨率的AMSR-E海冰密集度, 提取寻找纯像元新的解决方案, 并首次应用于南极海冰研究, 提取2003年—2010年南极海冰密集度变化的平均值。

1 数据和他方法

1.1 数据选择和预处理

采用ASI(基于AMSR-E 89 GHz通道数据)^[6]反演得到

收稿日期: 2011-08-10; 修订日期: 2011-12-21

基金项目: 国家高科技研究发展计划(863计划)项目(2006AA09Z137)资助

作者简介: 毕海波, 1985年生, 中国科学院遥感应用研究所博士研究生 e-mail: gis0301000501@163.com

* 通讯联系人 e-mail: sara.lee317@gmail.com

的密集度产品空间分辨率为 $6 \text{ km} \times 4 \text{ km}$, 是传统算法 NASA-Team 和 Bootstrap 算法产品分辨率的 2~4 倍。空间分辨率提高有利于混合像元分解过程中纯净端元的提取。

南极海冰周期变化明显, 其年际振荡特点是^[9,10]: 罗斯海(Ross Sea)以 4~6 a 周期为主, 也有 8 a 左右的周期, 威德尔海(Weddell Sea)以 4~6 a 周期为主, 阿蒙森海(Amundsen Sea)以 3~6 a 周期为主, 普里兹湾海域(Prydz Bay)以 5~8 年周期为主, 另外各海区还存在近 3 a 左右的振荡期。因此, 利用 8 年(2003 年—2010 年)遥感数据能够涵盖南极各海域主要的海冰密集度短周期内变化特征。

TMA 分析所使用的数据由各个月份平均海冰密集度的 8 年平均值组合成的 12 波段数据(例如, 波段 1 是 8 年 1 月

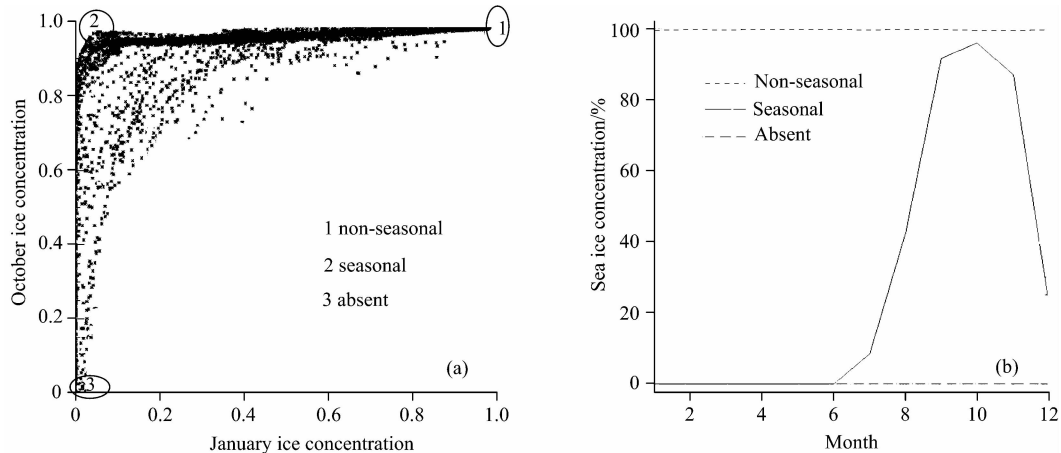


Fig. 1 Three sea ice endmembers definition (a) and their temporal spectra (b)

选取合适的端元是混合像元分解成功的关键。端元位于不同波段构成特征空间的极端位置: 比如南极一月(夏季)和十月(冬季)组成的特征空间, 有如图 1(a)中的 1, 2 和 3 所示三种端元。从图 1(b)中可以看出这三种端元分别代表: (1)背景海域。如南极海冰边缘以北从未结冰的海域, 密集度全年为 0%; (2)季节性海冰。这类海冰冬季密集度高, 夏季偏低甚至消失; (3)非季节性海冰, 即海冰密集度全年为 100%。

1.2.1 端元选取

全年为 0% 和 100% 的非季节性端元, 具有明确物理意义, 但是不同区域南极海冰季节性变化存在差异, 图 1(b)中的季节性端元波谱曲线不能够涵盖所有的季节性海冰, 因此提取其他典型季节性端元的波谱是本混合像元分析的关键。

1.2.2 端元提取算法

有研究^[7]利用 minimum noise fraction transform (MNF)^[11]对数据降维, 并利用 pixel purity index (PPI) 进行了像元提纯, 来获取纯净像元, 但是这种方法有其局限性: 首先, MNF 本质是一种经过两次主成分变换的线性变换。通过数据轴的旋转, 对噪声协方差矩阵进行主成分分析, 以实现噪声数据的波段之间去相关性, 并将其重新调整得到单位方差的噪声数据。其次, 第二次变换使用第一次变化所得数据进行主成分分析。通过对处理后数据进行特征值和相应的影像进行检验, 确定数据内在维度, 实现噪声与信号

数据的平均值)。所得数据满足多波段数据处理的三个条件^[8]: (1)波段数据是单参数变量。海冰密集度提供了将不同时期海冰光谱信息集中到一个单独参数的一种有效方式; (2)数据之间精确配准。AMSR-E 海冰密集度数据被统一配准到 Polar stereographic 投影下; (3)波段数据要经过归一化处理。ASI 算法反演的不同时期的海冰密集度已归一化至同一数据范围(0%~100%)。

1.2 TMA 分析

混合光谱分析(SMA)目的是对混合像元进行分解, 提取具有不同光谱特性, 代表不同地表覆盖在某一像元内所占的百分数(丰度)。相应的 TMA 用来提取具有不同时间变化特性[图 1(b)]的组分在像元内的所占比例。

的分离, 最终改善后续波谱处理结果。然而, 对于遥感海冰密集度数据而言, 影像数据只保留海冰密集度数据, 陆地已被掩膜去除, 被认为噪声的常年无海冰的区域海冰密集度为 0%, 方差为 0%, 因此 MNF 的第一次变换, 即对噪声进行估计时, 将不能实现对噪声的拉伸至单位方差的处理, 算法不能够正常执行, 不能实现对海冰密集度 MNF 降维处理。其次, 利用 PPI 进行交互性提取端元, 受分析者主观因素影响大, 结果差异因人而异。其他的像元提取方法如 ORASIS, N-FINDR, iterative error analysis (IDEA), 也是通过寻找线性独立的端元, 然后利用普通线性模型进行混合像元的分解运算。理论上, 只要端元数量 m 小于等于 $L+1$ (L 表示波段数), 线性方程组就可以求解。但是由于环境、内在的差异和空间分辨率粗糙, 同物异谱普遍存在, 一种地物可能对应多个端元波谱(这些端元波谱构成波谱束), 由于普通线性方法选取端元数目受到限制, 特别是对动态变化大的海冰而言, 结果可能会出现较大误差。而 SMACC 不仅能够克服波段数目受限制的缺陷, 而且其全自动的端元提取方式, 大大提高了数据处理效率, 消除了人为主观因素对结果的影响。算法详细说明请参阅文献[12], SMACC 模型如下

$$H(c, i) = \sum_k^N \mathbf{R}(c, k) \mathbf{A}(k, j) \quad (1)$$

其中, i 是指像元下标; j 和 k 指端元下标, 取值 $1 \sim N$; \mathbf{R} 为端元波谱矩阵; c 指波段下标; \mathbf{A} 代表每个像元内, 端元 j 在

端元 k 中的比例矩阵。

此外, SMACC 算法有三个可选约束条件保证了丰度值物理意义上的明确性, 防止结果数据溢出: (1) Positive only; (2) Sum to unity or less; (3) Sum to unity。有研究^[12]认为当数据为归一化数据(反射率、密集度等)时, 约束条件 2 最佳因此本工作选择约束条件 2 的控制下进行混合像元分解计算。

1.2.3 确定端元数目

图 2 显示 SMACC 模型最大相对误差随着端元数增加而变化的曲线, 当端元数大于 10 时, 最大相对误差变化小(22%~16%)。将 SMACC 获取端元代入式(3), 通过获得残差图像(relative error, RE)来判定端元选取的优劣, 虽然 SMACC 不受端元数目限制, 但是为防止公式(3)出现病态解, 端元数目不超过 12, 本方法选取了当 SMACC 最大端元设置为 10~12, 所得 SMACC 在不同数目端元下残差统计结果表明当最大端元设为 12 时, 误差为最小值(表 1)。

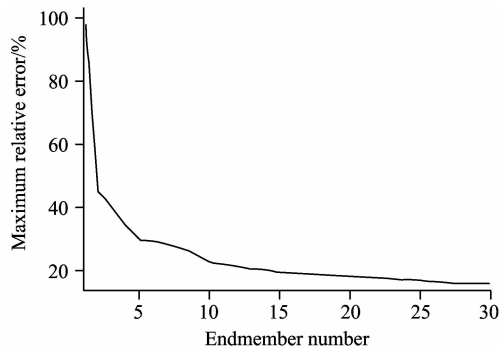


Fig. 2 Maximum relative error variations through SMACC as number of endmember increases

Table 1 RMS statistics for different number of endmembers

Predefined endmember number	Derived endmember number through SMACC	Mean RE /%	Variance of RE /%
10	8	3.47	5.17
11	10	1.33	1.95
12	11	1.00	1.53

1.2.4 端元合并

当 SMACC 最大可获取端元数目设定为 12 时, 实际获取 11 个端元谱线, 但有些曲线相关性高, 形状相似, 有必要对其进行合并, 减少数据冗余。由于端元是处于最极端位置的像元, 因此采取如下措施对相关性的端元进行合并处理^[8]

$$TM_i = \begin{cases} \text{Max}_i, & \text{if } \text{Mean}_i > \text{Median}_i \\ \text{Min}_i, & \text{if } \text{Mean}_i < \text{Median}_i \end{cases} \quad (2)$$

其中, TM_i 是合并后的端元在波段 i 的海冰密集度; Max_i 和 Min_i 分别指被合并端元中 i 波段最大值和最小值; Mean_i 和 Median_i 指被合并端元在 i 波段平均值和中值。

如图 3(b)所示曲线是由图 3(a)三条时谱曲线经上述提纯然后合并而成。经过合并处理后得到 7 条海冰密集度随时间变化的时谱曲线(见 2.2 节)。

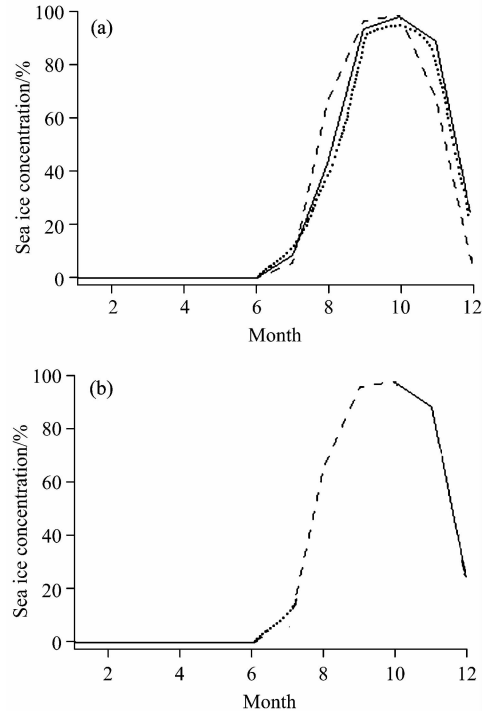


Fig. 3 Example for endmember purification

2 结果

2.1 残差分析

为了验证上述端元的代表性, 采取将 SMACC 获取的经合并后的 7 个端元应用线性混合模型, 如式(3)所示, 求得每个像元的残差(图 4)。图 4 显示 RE 值较小(0%~8.22%), 位于海冰密集度数据估算精度内, 同时残差图像空间连续性差, 说明无端元明显特征遗漏^[13], 进一步证明本方法所取端元选取的代表性高。

$TM_B = TM_1 \times F_1 + TM_2 \times F_2 + \dots + TM_n \times F_n + \epsilon$ (3)
其中, TM_B 是波段 B 的混合像元值; TM_n 是指端元 n 在波段 B 的时谱值(temporal spectrum value); F_n 指端元 n 在混合像元中的比例(丰度); ϵ 是残余误差。

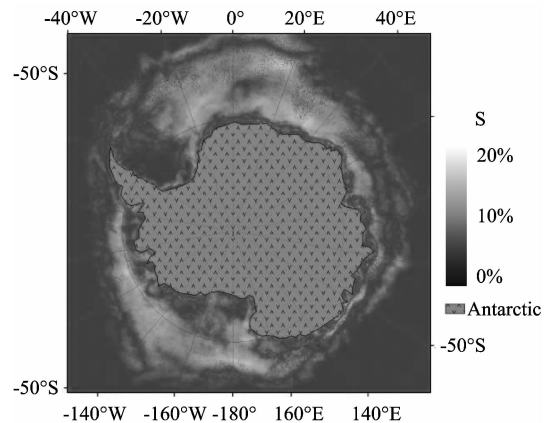


Fig. 4 Residual error image

2.2 SMACC 获取的端元

限于篇幅,只选取 SMACC 获取的几种典型的季节性海冰进行说明。

空间分布上来看端元 2 分布呈环状环绕南极大陆(图 5),其外缘线基本上与南极海冰春季海冰最多时期的轮廓线位置吻合,其中威德尔海海冰外缘线距陆地最远,海冰覆盖范围最大。端元 2 类型海冰 35% 的覆盖区域丰度值大于 50%,该季节性海冰是南极的主导类型。波谱曲线显示,该类型海冰与一年生海冰相关联,夏季全部融化,密度为 0;冬季海冰密集度由 6 月陡升至 90% 以上,密集度冬季增加的原因在于:一方面与气温在冬季降低,海水结冰,另一方面是海洋动力将高纬度海冰北向输送至较低纬度区域^[9],新海冰在高纬不断生成。

端元 4 和 5 波谱曲线相似,大多数时间海冰密集度高

(图 6)。端元 4 在夏、冬季密集度差异达 90%,相对而言,端元 5 海冰密集度季节差异更大(0%~100%)。端元 4 和 5 可能与海冰开关对环南极海流的控制作用有关^[14,15],因为在短周期内(5~8 年),海冰开关(德雷克海峡海冰开关、澳大利亚海冰开关和非洲海冰开关)与海冰进退关系重大。威德尔海和罗斯海两种端元分布范围的丰度的此消彼长:当南极洲的气温变冷时,德雷克通道存在较多海冰(威德尔海海冰分布也较多),处于封冰状态,阻塞环南极大陆海流,加快南太平洋环流,并从向极方向连接南极洲热输送,因而使得南极洲附近海域相对变暖,密集度季节差异相对较小,同时,罗斯海附近海冰少,如图 6 中端元 4 分布所示。当南极洲的气温变暖时,德雷克通道存在很少海冰,处于开放状态,打通环南极大陆海流,减慢南太平洋环流,并从向极方向隔离南极洲热输送,因而使南极洲附近海域变冷结冰,海冰密集度

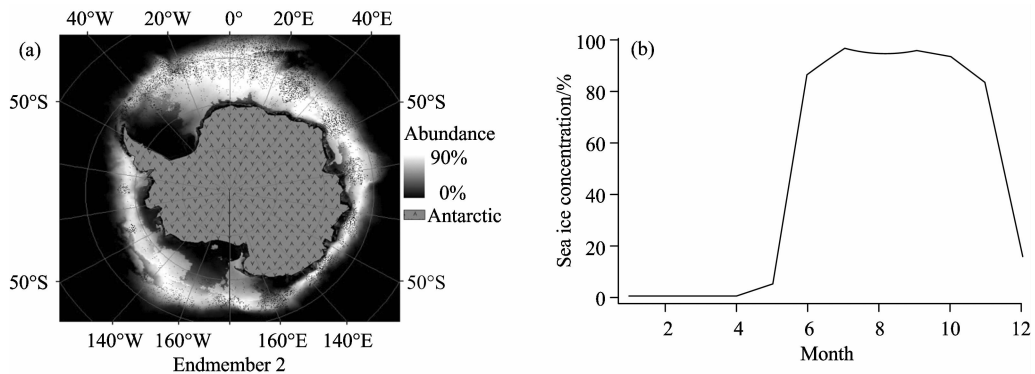


Fig. 5 Abundance image of endmember 2 (a) with its temporal spectrum (b)

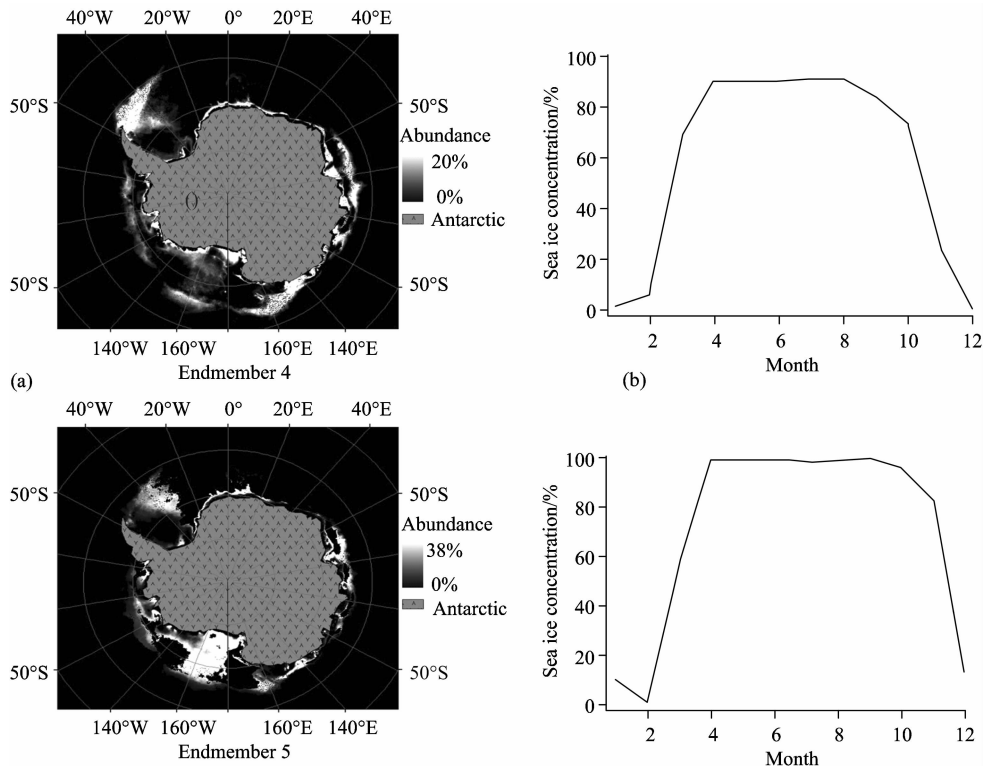


Fig. 6 Abundance image of endmember 4 and 5 (a) with its temporal spectra (b)

季节差异相对较大, 罗斯海冰增多, 如图 6 中端元 5 分布所示, 威德尔海海冰分布少, 而罗斯海多。这与前人研究的威德尔海与罗斯海之间的海冰涛动现象一致^[15]。事实证明, 端元 4 和 5 分别反映南极洲气温变冷和变暖两个不同时期海冰密集度随时间变化模式^[14]。

3 年际海冰密集度变化监测中的应用

本文先前获取的端元是 8 年 AMSR-E 海冰密集度数据的平均值(背景值), 当把这些端元应用于某一年 12 波段月均海冰密集度数据时, 可以通过残差来检测其相对背景值的变化, 比如当残差较大时, 说明该年海冰密集度变化与平均值相差较大, 南极气候可能出现异常。本文选取了 2005 年和 2010 年验证 TMA 方法在海冰密集度年际变化中的适用性。

表 2 数据和图 7 显示, 与 2005 年相比, 2010 年与多年平均相差较大。这与实际情况相吻合, 2010 年南极气温偏高, 南极海冰开关区域如德雷克海峡的海冰减少, 德雷克海峡水通量增加, 导致环南极大陆水流速度变快, 南太平洋环

流速度变慢, 使得部分本应北上的水流逆转而进入德雷克海峡, 环南极海流增强, 则海冰被大量的搬运, 造成不同区域海冰密集度月均变化差异较大, 这从图中也可以看出。另外从 2005 和 2010 年残差空间分布显示残差大的区域主要分布于南大西洋和东部南太平洋的季节性海冰分布区域, 而位于威德尔海和罗斯海等海域的非季节性海冰分布区, 残差小, 变化不大。事实证明, 将多年平均数据提取的端元应用于某一年数据, 得到该年端元丰度, 不仅可以将其作为记录不同类型海冰密集度随时间变化特征的时空分布, 而且可用来检验其与多年“背景值”的相对变化^[7]对南极气候和环境变化的影响。

Table 2 Residual error statistics for specific timing

	Maximum RE/%	Minimum RE/%	Mean RE/%	Variance of RE/%
Average(2003—2010)	8.22	0	1.00	1.53
2005	17.54	0	1.42	2.4
2010	20.18	0	1.7	2.87

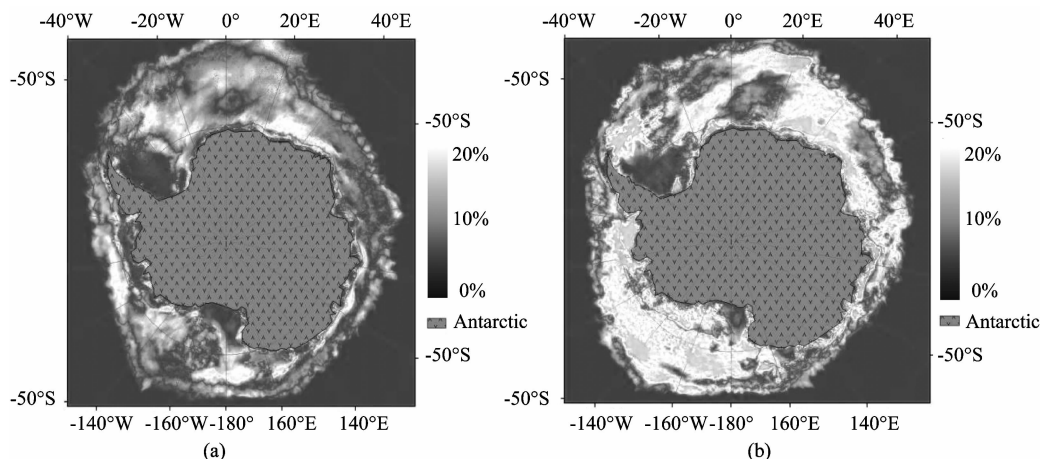


Fig. 7 Derived RE images for 2005 (a) and 2010 (b) when using “normal” temporal spectra

4 结论

传统的混合像元处理方法着重于地物识别和分布研究, 很少注意利用其随时间变化特性。但是真正理解地物特征随时间的变化特性和正确的利用地物光谱、空间特性具有同等重要的意义。在本研究中, 时间域混合像元分析方法 TMA 被用来提取海冰密集度季节变化特性。需特别注意, 不同于传统方法(如主成分分析、图像分类), TMA 所获取的图像是对地物不同的时间变化特性的空间表达。本文所用的端元是通过 SMACC 方法提取, 该方法效率高, 获取端元数目不受数据波段数目限制。使用经提纯后的端元进行时间域混合像元混合分解后所得残差小, 能够较好描述南极地区的海冰季节变化特性。另外, TMA 也可用于海冰密集度变化检测。

将 SMACC 获取的 8 年平均端元波谱应用于 2005 年和 2010 年海冰密集度数据, 混合像元分解后所得残差图像, 能够很好的表征其与多年平均值的差异。结果显示相对于 2005 年, 2010 年与平均值有较大差异, 且出现差异的地区集中于一年冰海域, 多年冰区域则差异很小, 几乎为 0%。在全球气候变化的背景下, TMA 提供了一个用于对比多年历史平均数据和新得到数据的新方法。正如本研究提取端元代表的是研究时间段内海冰密集度的随时间平均变化情况, 可以作为研究该周期内海冰密集度变化的环境背景值。

由不同时间特性而不是光谱特性来定义南极海冰类型, 是 TMA 与传统的图像处理不同之处。另一方面, 由于缺少实测数据支持, 验证工作尚未展开, 这是该研究的下一步工作计划。

References

- [1] Marcel N, Hudson S R, Sebastian G. *Cold Regions Science and Technology*, 2010, 62(1): 14.
- [2] Worby A P, Steer A, Lieser J L. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2010, 58(2011): 1125.
- [3] Makynen M, Hallikainen M. *International Journal of Remote Sensing*, 2005, 26(10): 2081.
- [4] Mitchelson-Jacob E G. *International Journal of Remote Sensing*, 1996, 17(5): 1019.
- [5] Tonboe R, Toudal L. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 97(3): 277.
- [6] Meier W N, Dai M. *Annals of Glaciology*, 2006, 44: 352.
- [7] Piwowar J. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2008, 10(1): 92.
- [8] Piwowar J M, Peddle D R, Ledrew E F. *Remote Sensing of Environment*, 1997, 63: 195.
- [9] ZHAO Yu-chun, SUN Zhao-bo, NI Dong-hong(赵玉春, 孙照渤, 倪东鸿). *Journal of Nanjing Institute of Meteorology(南京气象学院学报)*, 2000, 23(3): 330.
- [10] MA Li-juan, LU Long-hua, BIAN Lin-gen(马丽娟, 陆龙骅, 卞林根). *Chinese Journal of Polar Research(极地研究)*, 2004, 16(1): 29.
- [11] Green A A, Berman M, Switzer P. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1988, 26(1): 65.
- [12] Gruninger J, Ratkowski A J, Hoke M L. *Proceedings SPIE*, 2004, 5425-1.
- [13] Zhao X, Qiu Q. *Remote Sensing Technology and Application*, 2009, 24(6): 737.
- [14] YANG Dong-hong, YANG Xue-xiang(杨冬红, 杨学祥). *Progress in Geophysics(地球物理学进展)*, 2007, 22(5): 1680.
- [15] YANG Xue-xiang(杨学祥). *Global Geology(世界地质)*, 2003, 22(4): 380.

Temporal Mixture Analysis Application in Monitoring the Antarctic Sea Ice Concentration Variability

BI Hai-bo^{1,2}, LI Shuang-shuang^{3*}

1. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

2. Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

3. School of Information, Remin University of China, Beijing 100872, China

Abstract Temporal mixture analysis (TMA) is deduced from spectral mixture analysis (SMA). They are algebraically identical except for that TMA is applied to temporal spectra and thus can extract the temporal characteristics of features. The ice concentration is diverse across the Antarctic sea through different periods, and TMA has a great potential to obtain this variability as an environmental normal. In the present study, sea ice concentration data remotely sensed by AMSR-E from 2003 to 2010 were used and seven typical endmembers were captured, standing for temporally different sea ice classification. TMA can also be utilized in change analysis of Antarctic sea ice concentration for its capability to record the spatial distribution of temporal characteristics, allowing further study of regional or global climatic variations. In short, TMA supplies a new method for researchers to investigate the spatial and temporal variability of polar sea ice.

Keywords Sea ice concentration; Antarctic; TMA; AMSR-E; SMACC; Passive microwave remote sensing

(Received Aug. 10, 2011; accepted Dec. 21, 2011)

* Corresponding author