

研究论文

澳洲南部海域二甲基硫海气通量的分布及预测

姜丽梅¹ 瞿波²

(¹ 崇川学校, 江苏 南通 226000;

² 南通大学理学院, 江苏 南通 226019)

提要 海洋生物二甲基硫(DMS)的海气通量能改变云层的变化和区域的太阳辐射量,降低地球表面的温度,而极地的大量融冰导致 DMS 海气通量(DMS flux)对气候的影响更明显。文章中研究了 2012—2014 年亚南极几乎无冰的澳洲南部海域(40°S—60°S, 110°E—140°E)环境数据(包括:风速、云盖、海表温度、叶绿素、冰盖和混合层深度)的区域分布和年际变化。继而用遗传算法校准 DMS 模型的参数,得到 DMS 浓度和 DMS flux 在研究区域的分布。最后用耦合模型相互比较项目(CMIP5)试验预测未来(大约 2100 年)在四倍二氧化碳环境下的 DMS flux,并与当代(2012—2014 年)一倍二氧化碳的情形作比较。研究结果显示:四倍二氧化碳情形下的海表温度、云盖和风速分别上升了 0.9%、5.6%和 12.3%,混合层深度下降了 41.0%;海气传输速度的增加率为 58.8%,由于很少的融冰,DMS flux 只增加了 9.4%,因此,DMS flux 的增加速度远比不上南北极。研究结果表明,亚南极几乎无冰的澳洲南部海域的 DMS 对减弱温室效应的作用不明显。

关键词 亚南极 二甲基硫浓度 二甲基硫海气通量 遗传算法 叶绿素

doi: 10.13679/j.jdyj.20180018

0 引言

气候与海洋生态系统密切相关,科学家们发现了海洋生物可以产出一种大气硫化物的主要天然源——二甲基硫(dimethylsulfide, DMS),其主要来源是浮游植物的直接排放和前体二甲基磺基丙酸(dimethylsulfoniopropionate, DMSP)的分解转化。DMSP 是海洋藻类的一种硫代谢产物,在酶的催化作用下通过自然衰老、细胞裂解、浮游动物摄食、病毒感染、细菌消耗等活动生成 DMS^[1]。DMS 进入大气后被氧化形成硫酸盐气溶胶,促进云凝结核的增加和辐射,不仅可以影响大气酸度和辐射平衡,而且还提高了云对太阳光的反射率,减少全球热量,减弱温室效应^[2]。1987 年,Charlson 等^[3]提出了 CLAW 假设,即海表温度的

上升会增加藻类 DMS 的产生,而 DMS flux 对温室效应有负反馈作用。此后,学者和科学家开展了一系列有关 DMS flux 的研究工作。

2013 年, Gabric 等^[4]发现 DMS flux 的扰动对南半球气候的影响最大,北半球 DMS 的增加量只有 9.9%,南半球 DMS 的增加量高达 47.3%。故北半球海表温度(sea surface temperature, SST)只降低了 0.4 K,南半球 SST 平均降低了 0.8 K。在南半球,50°S—60°S 区域的 DMS 年累积挥发量最大。南半球在全球气候系统中具有重要的地位^[5]。

2003 年, Gabric 等^[6]根据 DMS 生产的敏感性模拟南极南大洋东部(60°S—65°S, 125°E—140°E)的气候变化,叶绿素浓度(chlorophyll, CHL)最高值是在夏季, DMS flux 在夏末秋初时很高,与 DMS 的分布大致相同,特殊的是 DMS flux 在夏季时的双峰,这主要与周边环境的风速(wind

[收稿日期] 2018 年 3 月收到来稿,2018 年 6 月收到修改稿

[基金项目] 国家自然科学基金(41276097)资助

[作者简介] 姜丽梅,女,1991 年生。硕士,主要研究环境模型。E-mail: 283124420@qq.com

[通信作者] 瞿波, E-mail: qubo@ntu.edu.cn

speed, 以下简称 WIND), 海表温度(SST) 和混合层深度(mixed layer depth, MLD) 有关, Kettle 和 Andreae^[7]早在 2000 年就注意到了 DMS flux 在夏季的特殊。一般地, 南极的平均风速高于北极, 但季节性周期同北极一样, 风速在冬季最高, 夏季最低, 平均风速大约是 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[6]; 海表温度季节性的最高值在二月下旬, 最低值大约在八月下旬。2008 年, Korhonen 等^[8]探讨了南半球海洋中二甲基硫化物排放对云凝结核浓度和季节性的影响, 指出从 12 月到次年 2 月 DMS 对云凝结核的影响较明显, 云凝结核的浓度在 45°S — 60°S 增加了 18%, 在 60°S — 75°S 的增加了 40%。

前人对南北极的研究^[9-10]显示, 南北极的 DMS flux 在 2100 年(4 倍二氧化碳)将有一个很大幅度的提升。而在亚南极的情况又是怎样的呢? 本文将着手研究澳洲南部海域(40°S — 60°S , 110°E — 140°E)(图 1)在近年来 DMS flux 的分布, 并首次研究 2100 年澳大利亚南部海域(亚南极)DMS flux 的变化趋势, 以及 DMS flux 对未来气候的影响。气候变暖导致这一地区几乎成了无冰区域。南极绕极流(Antarctic Circumpolar Current, ACC)是该区域周边的主要洋流, 也是完全围绕地球流动的洋流。ACC 传输的水量比其它任何洋流都多, 为 $1.5 \times 10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 相当于全球所有河流水体积的 150 倍。显然, ACC 强烈影响着海洋生物的活动及 DMS 的浓度。

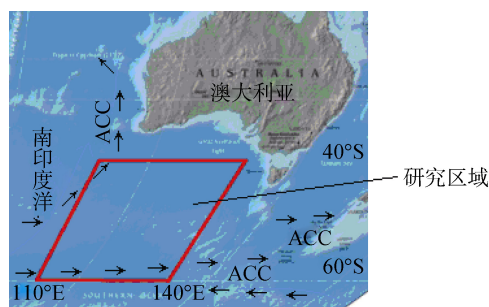


图 1 研究区域周边环境和水流方向

Fig.1. The surrounding environment and flow direction of the study area

1 数据和方法

1.1 研究数据

本文首先提取和分析 2012—2014 年研究区

域(澳洲南部海域: 40°S — 60°S , 110°E — 140°E)中影响 DMS 的主要环境数据。利用 SeaDAS 软件从全球卫星数据 MODIS 网页(<http://modis.gsfc.nasa.gov/>)获取 2012—2014 年研究区域 CHL 每 8 天的数据包, 通过 MATLAB 程序编程提取 CHL 的时间序列分布数据; SST 和 WIND 的全球数据来自同一网页 (<http://www.remss.com/>), 云盖(cloud cover, 下文简称 CLOUD) 的数据来源于 MODIS 网页(<http://gdata1.sci.gsfc.nasa.gov/>), 通过 MATLAB 程序处理和计算这 3 年研究区域的 SST、WIND 和 CLOUD 的月平均值数据。随年代变化的混合层深度(MLD)数据来自 Argo Mixed Layers 网站(<http://mixedlayer.ucsd.edu/>), 下载 nc 格式的 MLD 全球数据包及其 MATLAB 程序, 修改并运行 MATLAB 程序获得 2012—2014 年研究区域的 MLD 月数据。

接着, 采用遗传算法(genetic algorithm, GA)校准二甲基硫模型的主要参数, 这里分两步进行: 第一步对有关叶绿素的参数进行校准, 第二步对有关 DMS 的参数进行校准, 继而用二甲基硫模型计算 DMS 和 DMS flux 在 2012—2014 年的分布; 最后, 提取耦合模型相互比较项目(Coupled Model Intercomparison Project 5, CMIP5)试验中 4 倍二氧化碳($4 \times \text{CO}_2$)时的环境数据(包括海表温度、混合层深度、云盖和风速), 与 2012—2014 年这 3 年平均的叶绿素浓度数据和 DMS 的分布数据一起, 再次利用遗传算法校准二甲基硫模型中的参数, 预测在未来近 100 年 4 倍二氧化碳情况下的浮游动物、DMSP、海表风速和 DMS flux 的变化。

1.2 研究方法

Gabric 等^[11]于 1993 年首次建立了一个基于生态环境, 较为完整的 DMS 模型。Gabric 等后来又对模型做了改进, 如今该模型已广泛应用于南极海域^[6]和北极^[12-13]等研究地区。本文中使用的 DMS 模型主要由如下方程^[14]构成:

$$\frac{dP}{dt} = k_{23} \left(\frac{N}{N + k_{24}} \right) P - k_4 PZ \quad (1)$$

$$\frac{dZ}{dt} = k_4 (1 - k_{20}) PZ - k_{19} Z \quad (2)$$

$$\frac{dN}{dt} = k_{19} Z + k_4 k_{20} PZ - k_{23} \left(\frac{N}{N + k_{24}} \right) P \quad (3)$$

$$\frac{\partial DMSP}{\partial t} = k_5 \gamma P + k_{21} \gamma Z - k_{27} DMSP - k_{31} DMSP \quad (4)$$

$$\frac{\partial DMS}{\partial t} = k_6 \gamma P + k_{27} DMSP - k_{28} DMS - k_{29} DMS - k_{30} DMS \quad (5)$$

其中, 模型中 P , Z , N 的定义见表 1, 参数 k_i ($1 < i < 31$) 的解释如表 2 所示。

表 1 DMS 模型的状态变量^[14]
Table 1. DMS model compartments^[14]

参数	解释
P	浮游植物
Z	浮游动物
N	氮(如硝酸盐)
$DMSP$	二甲基巯基丙酸内盐
DMS	二甲基硫

目前, 主要通过模型来估算 DMS flux, 通常当海洋表面的 DMS 过分饱和时, DMS flux 可以由

DMS 海气传输速度 k_w 与海水中的 DMS 浓度(记为 DMS)计算得到:

$$F_{DMS} = k_w \cdot DMS \quad (6)$$

这里, 海气传输速度 k_w 主要受风速(简记: w)和海表温度的影响^[6],

$$k_w = \alpha 0.17 w \quad w \leq 3.6 \quad (7a)$$

$$k_w = \beta(2.85w - 10.3) + 0.61\alpha \quad 3.6 \leq w \leq 13 \quad (7b)$$

$$k_w = \beta(5.9w - 49.9) + 0.61\alpha \quad w > 13 \quad (7c)$$

其中, $\alpha = (600/Sc)^{2/3}$, $\beta = (600/Sc)^{1/2}$ 。对于一个给定的气体, 施密特数(Schmidt number, 简称 Sc)随海表温度(SST)的增加而减小, Sc 是由 Erikson 等^[15]给出的:

$$Sc = 2674.0 - 147.12 \times SST + 3.726 \times SST^2 - 0.038 \times SST^3 \quad (8)$$

需要注意 DMS 海气传输只在无冰水域发生, 所以本文的研究区域是无冰区, k_w 的计算结果误差较小。

表 2 DMS 模型的参数及解释^[14]
Table 2. Parameter values used in the DMS model^[14]

参数	解释	单位
k_4	与浮游植物生长有关的浮游动物的摄食率	$m^3 \cdot mgN^{-1} \cdot d^{-1}$
k_5	DMSP 中浮游植物的释放率	d^{-1}
k_6	DMS 中浮游植物的释放率	d^{-1}
k_{19}	浮游动物特定的氮排泄率	I_{k0}
k_{20}	浮游动物排泄物的氮摄取比例	—
k_{21}	DMSP 被浮游动物摄取的排泄率	d^{-1}
k_{23}	浮游植物中最大氮的摄取率	d^{-1}
k_{24}	浮游植物摄取氮的半饱和常数	$mgN \cdot m^{-3}$
k_{27}	DMSP 到 DMS 的转换率	d^{-1}
k_{28}	DMS 中的细菌消耗率	d^{-1}
k_{29}	DMS 最大的光氧化率	d^{-1}
k_{30}	大气中 DMS 的通气率	d^{-1}
k_{31}	DMSP 微生物消耗率	d^{-1}
I_{k1}	浮游植物细胞 S(DMSP):N 之比	—
I	混合层的光合有效辐射	$W \cdot m^{-2}$
I_k	光合作用的饱和强度	$W \cdot m^{-2}$
T	混合层(海表) 温度	$^{\circ}C$
I_{k2}	混合层(海表)一年中温度的最大值	$^{\circ}C$
$No = P + Z + N$	营养总和	$mgN \cdot m^{-3}$

2 结果

2.1 环境数据的分布

CHL 在 1 月最高, 在 6 月最低, 这与 Gabric 等^[6]在南极的研究成果一致。6 月是南极的冬季时节, 叶绿素浓度数据的缺失, 主要是因为日昼的缩短和较高的云盖与海冰的覆盖, 图 2a 是 2012—2014 年 CHL 的分布。图 2b 是 2012—2014 年这 3 年平均的 CHL 分布, CHL 的平均浓度在 2 月不太稳定, 冬季最稳定。

SST 的变化可以严重影响海洋和气候系统的变化^[16]。一般 SST 和 WIND 成反比^[17], 增加 WIND 会导致更多海水的蒸发和 SST 的降低。2012—2014 年间整个研究区域的 SST 变化不大, 均在 11.3℃—15.3℃。一般 SST 在 2 月达到峰值, 接着逐渐降低, 直到 9 月, 再呈上升趋势。

海表面的藻类会随着不同的风向和海水流向移动, 因此 WIND 对海表面藻类等浮游植物的分布影响较大。2014 年 7 月—10 月风速相对小一些, 冬季风速最大, 可达 11.4 m·s⁻¹, 如图 2c 所示, 2012 年与 2013 年的最大风速在 8 月, 2014 年的最大风速在 6 月, 比前两年超前了两个月。夏季的风速最低, 2012 年与 2013 年的最低风速在 2 月, 2014 年在 1 月的风速最低, 约 7.8 m·s⁻¹。

当云的物理特性发生变化时就会对全球辐射差额及气候变化等产生举足轻重的作用^[18]。2010 年, Quaas 等^[19]研究得出全球云盖的覆盖率将会逐渐下降, 大约每 10 年下降 0.4%。2012—2014 年间云盖的月平均值都在 80% 以上, 冬季云盖最高, 特别是 2014 年云盖可达 95.2%, 夏季的云盖最低, 2014 年 1 月的云盖最低, 大约为 81.1%。由图 2d 可见, 这 3 年云盖的最低值和最高值都是在 2014 年。

通过降水、风力强迫、太阳辐射等作用, 海洋的上表层会形成一个温度、盐度、密度几乎垂向均匀的混合层^[20]。因为海洋与大气的动量、能量、物质交换主要通过混合层进行, 通过混合层的能量输送为海洋提供了大部分的动能^[21], 所以混合层在海-气相互作用过程中起到了重要的作用^[22]。一般 MLD 夏季低, 春天高。如图 2e 所示, 2012、2013 和 2014 年的峰值分别是 9

月、10 月和 8 月, 最高值分别为 233.6m、259.5m 和 196.0m, 2013 年 MLD 峰值较其他两年滞后了 1—2 个月。

全球 DMS 数据网页没有完善, 2012—2014 年研究区域的 DMS 数据严重缺失, 用 Simo 的公式计算出来的 DMS 和文献中 DMS 峰值的时间不符^[23]。文中 DMS 数据来源于 Gabric 等^[24]2001 年的研究文章, 该文献中的研究区域与本文的区域十分接近, DMS 峰值在 12 月。

DMS 的数据范围大约在 0.5—2.5 nmol·L⁻¹, 夏季高, 冬季低, 这与 CHL 的分布趋势基本吻合。后面以此 DMS 数据作为研究区域的 DMS 观测值校准 DMS 的主要参数。

2.2 二甲基硫模型参数的校准

基于 2003 年 Gabric 等^[6]文章表 1 的参数值, 校准分为两个步骤^[25]: 首先是校准与 CHL 有关的主要参数; 然后校准与 DMS 有关的主要参数。

2.2.1 CHL 的参数校准

CHL 与生态环境中的许多因素都有关系, 本文用遗传算法校准了 2012 年、2013 年、2014 年以及 2012—2014 年平均的 4 种情况, 得到 I_k , k_4 , k_{19} , k_{20} , k_{23} 和 No 的最优参数值。

南极的 MLD 一般在 9 月最高, 二甲基硫模型在 MLD 最高值处开始校准得到的结果更好, 所以本次研究均从第 240 天开始校准。适应度函数(fitness) 是用 χ^2 检验基于与卫星数据的 CHL 每间隔 8 天平均值来做逼近。校准输出值和观测值之间的误差大小称为适应度函数, 适应度函数值越接近于零, 说明校准的结果越好。适应度函数的绝对值很小, 2014 年的适应度最好(表 3)。

将上述参数值输入模型中, 再运行 DMS 模型得到 CHL 的校准输出值, DMS 模型从每年第 240 天开始校准, 结果是每天的值, 而 CHL 观测值是每间隔 8 天的数据, 因此需要计算从 240 天开始每间隔 8 天的数据, 再与 MODIS 观测值(卫星数据值) 进行比较拟合。由图 3 可见, 整体拟合结果较好, 变化趋势也较为吻合。

2013 年 CHL 观测值与其他两年的稍有不同, 从第 248 天开始一直升高, 峰值在第 24 天, 模型输出值的峰值先于 MODIS 观测值 96 天, 且峰值

稍低一些(图未显示), 这是因为 2013 年 MLD 和 WIND 在 10 月到 11 月之间的大幅减小。MLD 在 10 月最深, 能够促进混合层浮游植物群落的

合成^[24-25]和食物网结构的完善。春季至夏季过渡时风速对 CHL 有很大影响, 风速越低, CHL 就会大量繁殖, 其浓度明显增大^[26]。

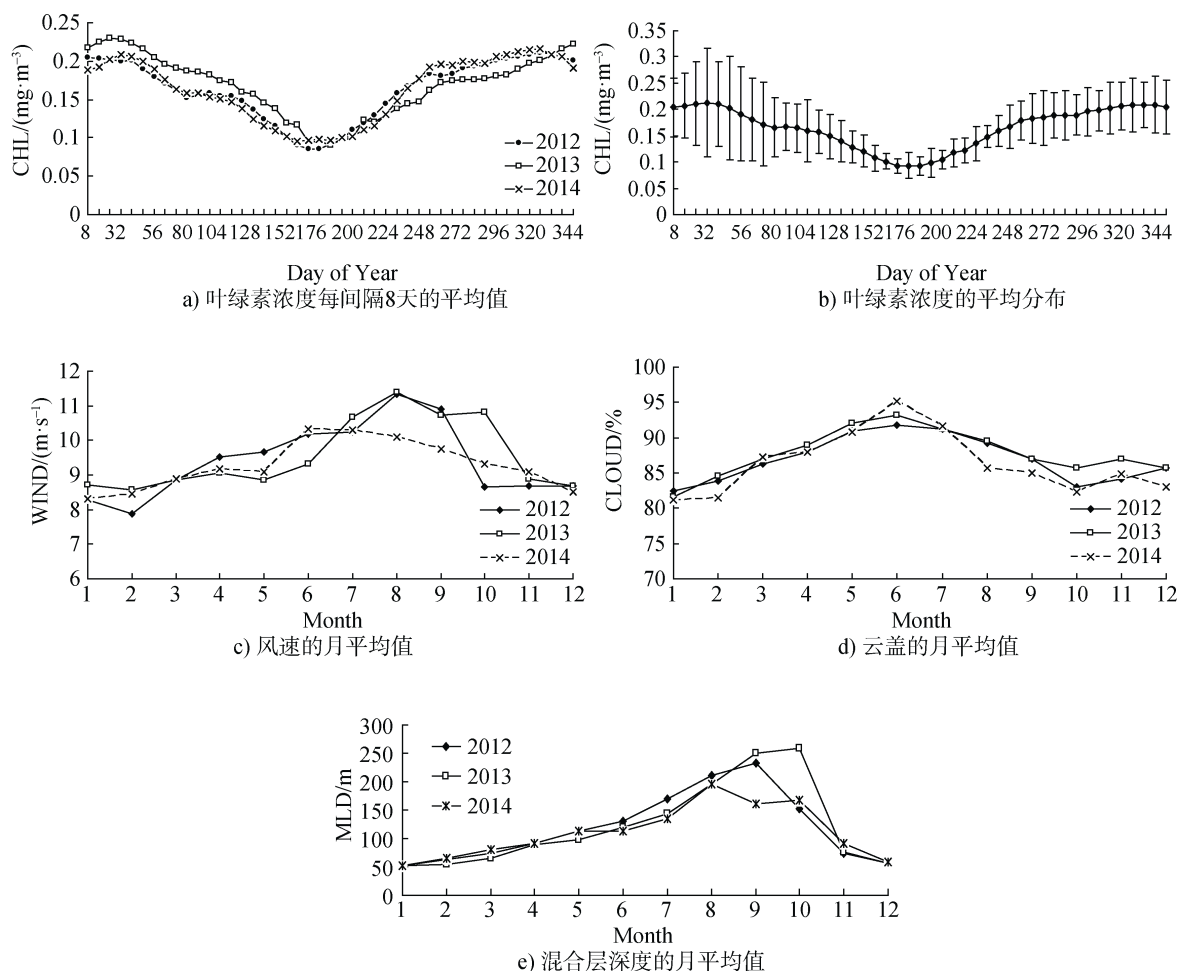


图 2 环境数据的时间序列分布. a),b) 叶绿素; c) 风速; d) 云盖; e) 混合层深度

Fig.2. Time distribution of environmental data. a),b) Chlorophyll; c) surface wind speed; d) cloud cover; e) mixed layer depth

表 3 遗传算法对 CHL 主要参数的校准结果

Table 3. Main parameters in CHL GA calibrations

	2012年(fitness=-0.139 9)	2013年(fitness=-0.232 3)	2014年(fitness=-0.082 0)	2012—2014年平均(fitness=-0.141 2)
k_4	$1.201\ 4\times 10^{-3}$	$6.864\ 8\times 10^{-4}$	$1.221\ 0\times 10^{-3}$	$1.244\ 2\times 10^{-3}$
k_{19}	0.084 5	0.078 7	0.090 0	0.094 8
k_{20}	0.441 9	0.102 0	0.445 7	0.384 5
k_{23}	1.699 4	14 816	1.491 3	1.497 8
I_k	30.195 6	25.013 7	35.995 9	34.047 9
No	360.14	574.52	301.36	303.53

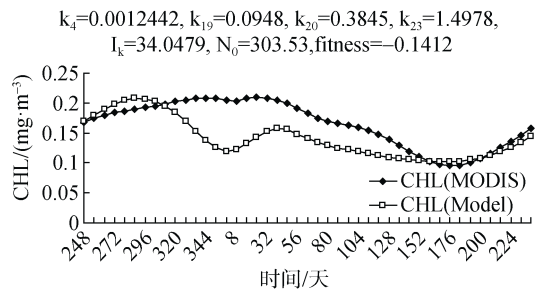


图 3 2012—2014 年平均 CHL 的 MODIS 观测值与 GA 校准输出值的对比
Fig.3. Comparison between the mean CHL MODIS observation value of 2012—2014 and the GA calibration output value

表 4 遗传算法对 DMS 主要参数的校准结果
Table 4. Main parameters in DMS GA calibrations

	2012年(fitness=-6.3677)	2013年(fitness=-6.4409)	2014年(fitness=-6.2214)	2012—2014年平均(fitness=-6.0784)
k_{27}	0.302 7	0.306 1	0.333 3	0.306 1
k_{28}	0.518 1	0.384 2	0.500 0	0.500 0
k_{29}	0.241 7	0.957 5	0.249 3	0.257 5
k_{31}	0.136 4	0.136 3	0.135 0	0.136 3
γ	0.852 4	0.777 3	0.700 0	0.777 3

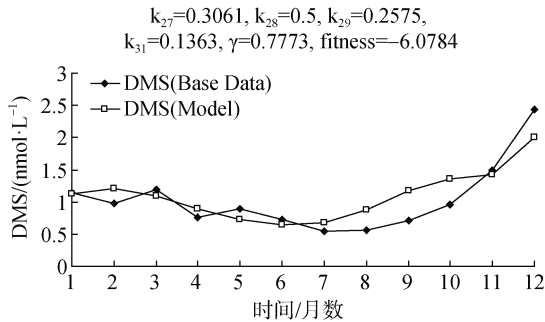


图 4 2012—2014 年平均 DMS 观测值与 DMS 模型校准输出值的对比
Fig.4. Comparison between the mean DMS observation value of 2012—2014 and the DMS model calibration output value

2.3 研究区域 DMS, DMS flux 分布

DMS flux 不仅与 DMS 浓度有关, 与海气传输速度 k_w 也紧密相关。传输速度 k_w 受 SST 和 WIND 的影响, 如图 5b 所示, k_w 的峰值在第 352 天达到, 即夏季传播速度较大。2012—2014 年 k_w 的峰值逐年递增, 2013 年的峰值不太明显, 这与 2013 年的风速和海表温度有关^[29]。

图 5c 中 DMS flux 的时间序列分布和图 5a 中

2.2.2 有关 DMS 的参数校准

影响 DMS 浓度的环境生态因素有很多, 本文校准了 γ 、 k_{27} 、 k_{28} 、 k_{29} 和 k_{31} 这 5 个较敏感的参数(表 4), 并将校准输出的 DMS 与 DMS 观测值进行比较。

2012—2014 年平均的二甲基硫模型输出值与观测值的拟合情况较好(图 4), 每年的二甲基硫模型输出值都是在 6 月最低(图未显示), 虽然 DMS 观测值的最低值在 7 月和 8 月, 但是亚南极的 6—8 月是冬季时节, 故研究区域的 DMS 浓度在冬季最低。这里的校准是月平均值的拟合图, 所以有一定的误差。

模型输出的 DMS 分布基本一致, 与研究区域 k_w 的峰值几乎是在同一时间段达到, 只有 2013 年的稍有不同。该区域 DMS flux 的变化趋势与 Gabric 等^[27]2004 年研究南极南大洋东部(60°S—65°S, 125°E—140°E)的结果大同小异, DMS flux 的敏感变化与海气环流模型中 MLD 的分布有十分密切的关系。

2.4 研究区域 DMS flux 预测

2.4.1 数据的提取

利用耦合模型相互比较项目(CMIP5)试验中的大气模型比较项目(Atmospheric Model Intercomparison Project, AMIP), 通过 OPeNDAP 系统的客户端访问和提取研究区域在 4 倍二氧化碳($4\times CO_2$)(大约是 2100 年)的数据, 运用 MATLAB 程序处理得到月数据。图 6 是当代 1 倍二氧化碳($1\times CO_2$)和 $4\times CO_2$ 情况下各输入数据的月平均值的比较图, $4\times CO_2$ 时的 SST 和 WIND 仍然满足对应关系, SST 的季节性变化更加明显; WIND 和 CLOUD 整体都大于 $1\times CO_2$ 的情况; 光照高的夏季 MLD 比较浅, 但整体都小于在 $1\times CO_2$ 的情况, 基本趋势仍类似。在 $4\times CO_2$ 情形下, SST、CLOUD

和 WIND 分别上升了 0.9%、5.6%和 12.3%, 变化不明显与无冰盖有关, MLD 下降了 41.0%(表 5)。尽管 2100 年春天 MLD 浅了, 但它仍然是相当深的(约 95 m), 夏天的 MLD 变化小, 这一变化不太可能在很大程度上影响 DMS 的生产量

和排放^[6]。

2.4.2 参数的校准

采用研究区域 2012—2014 年平均的 CHL 值和 DMS 观测数据, 加上提取 $4\times CO_2$ 研究区域的环境数据对二甲基硫模型的参数进行校准。表 6、

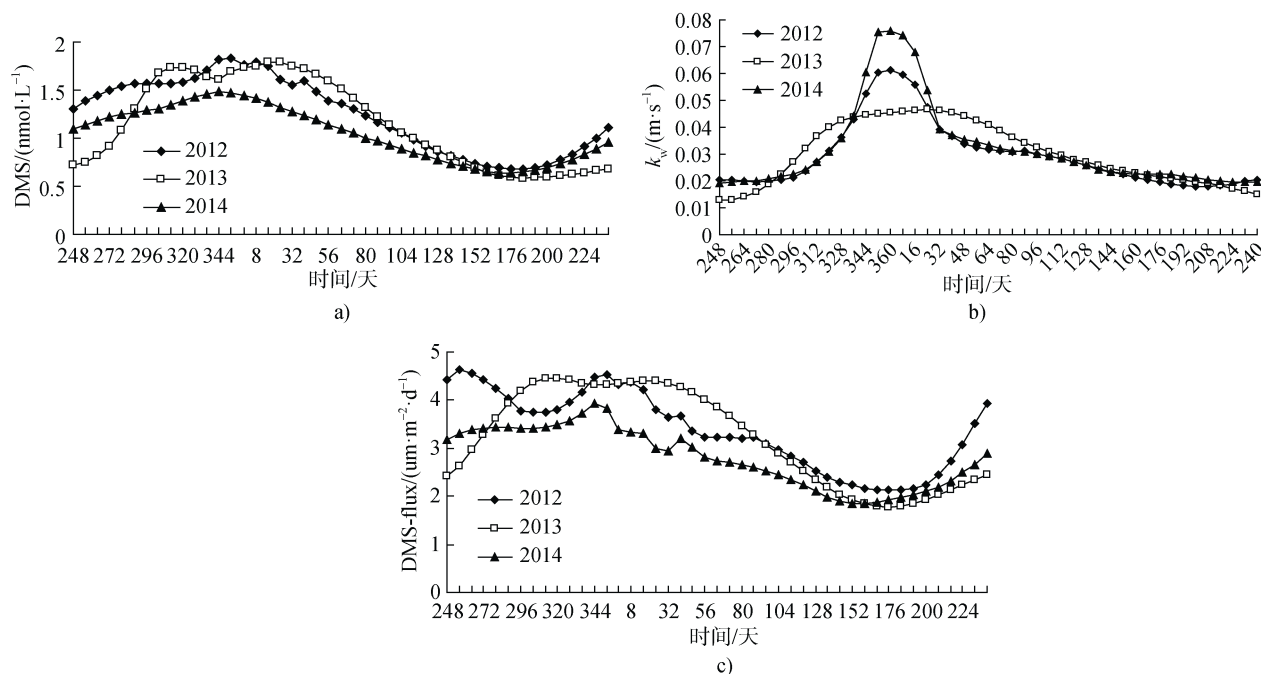


图5 2012—2014 年 DMS 模型校准输出的主要结果. a) 二甲基硫; b) 传输速度; c) 二甲基硫海气通量
Fig.5. The main results of the calibration output of DMS model in 2012—2014. a) DMS; b) k_a ; c) DMS flux

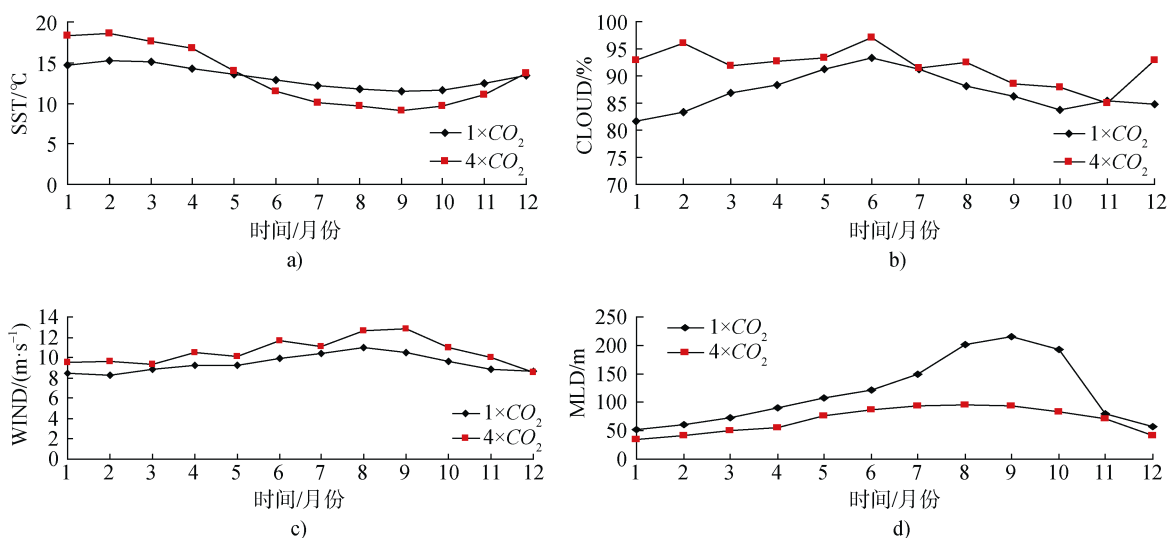


图6 在 $1\times CO_2$ 和 $4\times CO_2$ 情形下研究区域气候环境数据的比较图. a) 海表温度; b) 云盖; c) 风速; d) 混合层深度
Fig.6. Comparison of the study zonal transient climate data in the two periods of $1\times CO_2$ and $4\times CO_2$. a) SST; b) CLOUD; c) WIND; d) MLD

表 5 气候数据的预测结果
Table 5. The results of climate data predictions

40°S—60°S	SST	CLOUD	WIND	MLD
1×CO ₂	13.211	87.043	9.410	116.771
4×CO ₂	13.331	91.884	10.571	68.855
变化	0.9%	5.6%	12.3%	−41.0%

表 7 分别列出了 4×CO₂ 情形对 CHL 和 DMS 主要参数的校准结果。与在 1×CO₂ 情况一样，在 4×CO₂ 情况下模型输出的 CHL 峰值低于观测值峰值，峰

值提前 1 个月，整体拟合情况都较好。模型输出的 DMS 峰值高于观测值，与 1×CO₂ 时一样最低值在 6 月，整体拟合情况较好，如图 7 所示。

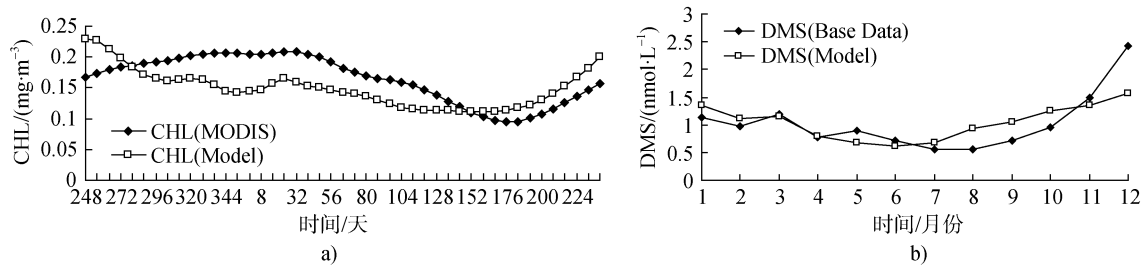


图 7 4×CO₂ 情况下校准的比较图。a)叶绿素；b)二甲基硫
Fig.7. The comparison diagram of calibration in 4×CO₂. a) CHL; b) DMS

表 6 4×CO₂ 情形下遗传算法对 CHL 主要参数的校准结果
Table 6. Main parameters in CHL GA calibrations of 4×CO₂

fitness	k_4	k_{23}	I_k	No	k_{19}	I_k
−0.188 2	0.000 762 6	1.0	34.13	300.3	0.08	0.2

表 7 4×CO₂ 情形下遗传算法对 DMS 主要参数的校准结果
Table7. Main parameters in DMS GA calibrations of 4×CO₂

fitness	k_{27}	k_{28}	k_{29}	k_{31}	γ
−6.431 0	0.300 2	0.511 0	0.255 0	0.103 6	0.646 3

2.4.3 预测的结果

将 1×CO₂ 和 4×CO₂ 模型输出值分别进行比较，如图 8 所示。CHL、DMS、DMSP 和 k_w 在 1×CO₂ 和 4×CO₂ 情况下很相近，峰值基本在同一时间达到，但在 4×CO₂ 情况下稍大些；DMS flux 在 12 月时两种情况很相近，但在其他时间段 4×CO₂ 比 1×CO₂ 情况下的 DMS flux 较高。

4×CO₂ 时的 DMSP、DMS flux 和 k_w 分别增加 10.0%、9.4%和 58.8%(表 8)，说明 CO₂ 增加，则 DMS flux 也会增加，虽然幅度不大，这可能与 MLD 较浅有关，符合 1999 年 Simó 和 Pedrósalió 的假设^[23]与 2003 年 Gabric 等^[6]的研究结果。同时，大气中云凝结核也会增加，可以提高云对阳光的反射率，使全球热量收入减少，最终达到减弱温室效应的作用^[2]。2011 年，Qu 和 Gabric^[25]研

究得北极 DMS flux 的增加量为 80%，而这里研究区域 DMS flux 的增加量相对小得多。这与研究区域没有考虑融冰有关。事实上，研究区域只有很少的积冰(小于 10%)。根据 Gabric 等的研究成果^[6]，越靠近南部的南极海域会有越多的融冰，DMS flux 会增加更多^[30]。

表 8 主要预测结果的比较
Table 8. Comparison of the main prediction results

40°S—60°S	DMSP/(nmol·L ⁻¹)	DMS flux/(μmol·m ⁻² ·d ⁻¹)	k_w /(m·s ⁻¹)
1×CO ₂	1.228	3.059	0.035
4×CO ₂	1.351	3.346	0.055
变化	10.0%	9.4%	58.8%

3 结论

本文研究了亚南极地区(40°S—60°S, 110°E—140°E)SST, WIND, CLOUD, MLD 和 CHL 在 2012—2014 年的年际分布，用遗传算法校准了该区域二甲基硫模型中与 CHL 以及 DMS 有关的主要参数。使用 CMIP5 试验预测未来大约 2100 年在 4×CO₂ 环境下 DMS flux，并与目前 1×CO₂ 的情形作比较。

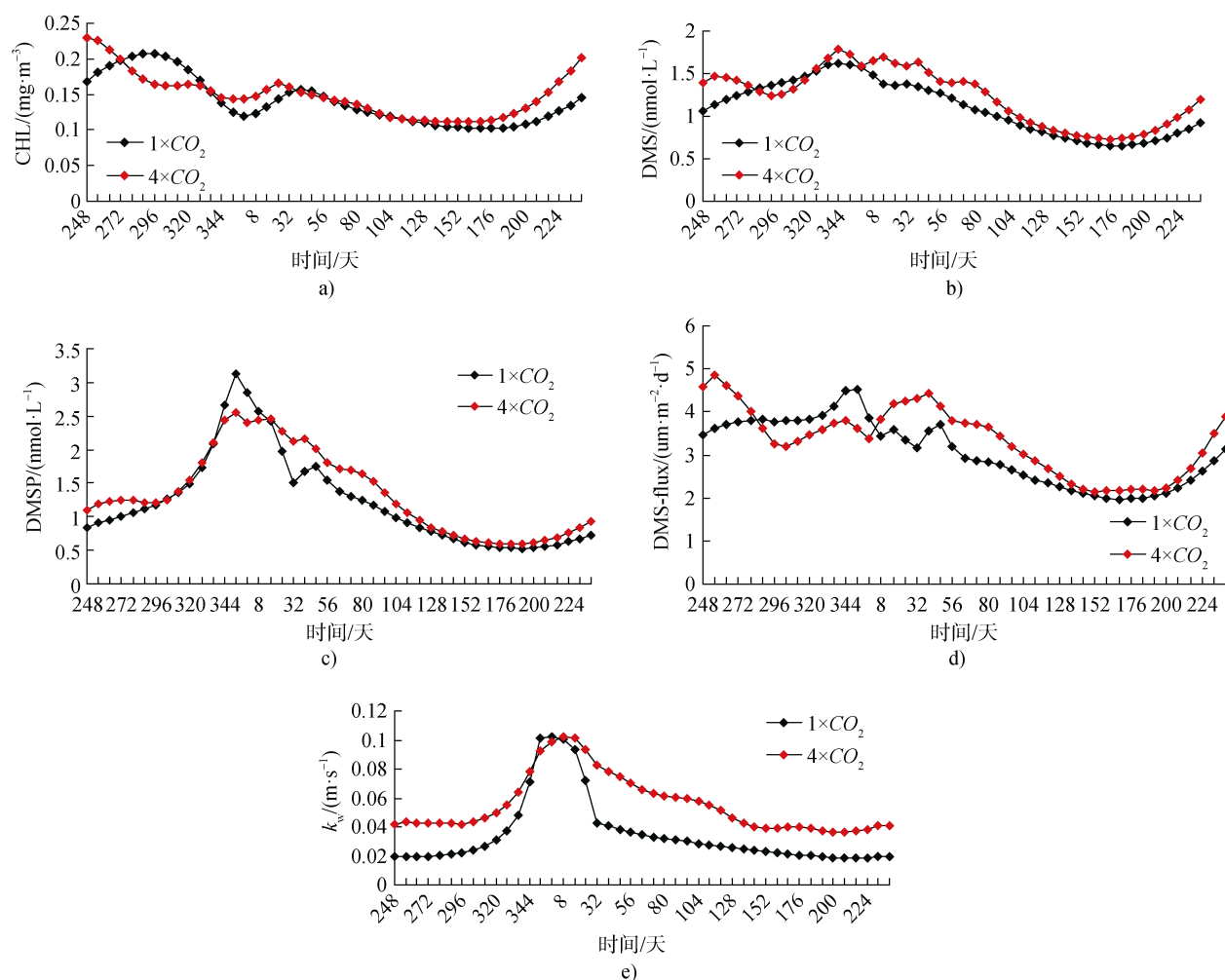


图 8 $1\times CO_2$ 和 $4\times CO_2$ 情况下 DMS 模型输出主要结果的比较图. a) 叶绿素; b) 二甲基硫; c) 二甲基磺基丙酸; d) 二甲基硫海气通量; e) 风速

Fig.8. Comparisons of the main results of the DMS model in the case of $1\times CO_2$ and $4\times CO_2$. a) CHL; b) DMS; c) DMSP; d) DMS-flux; e) k_w

校准结果显示研究区域 DMS flux 的分布与 DMS 基本一致, 与 k_w 同一时间段达到峰值, 只有 2013 年的变化趋势稍有差异, 这与 2013 年 MLD 在 10 月和 11 月的变化太大有关。

CMIP5 试验中 AMIP 项目是用来提取未来大约 2100 年 $4\times CO_2$ 时各生态环境的数据, 结合之前的校准再次对此模型中的参数进行校准, 对 $4\times CO_2$ 时 DMS flux 的分布作了预测和比较。最后, 分析和比较在 $1\times CO_2$ 和 $4\times CO_2$ 情况下的 DMSP、DMS flux 和 k_w 的变化情况, 结果显示, DMSP 增加率为 10.0%, k_w 增加率为 58.8%, DMS flux 增加率为 9.4%。适当地增加 DMS flux, 能够适当地减弱温室效应。

预测未来 2100 年研究区域的 DMS flux 增量并不大, DMS flux 主要取决于海水表层中的 DMS 浓度和 k_w 。由于海水中影响 DMS 浓度的因素有很多, k_w 又因为 WIND 和 SST 等因素的影响而变化, 所以生成 DMS flux 的过程异常复杂, 从而, 在实际研究过程中只能对某些因素和过程简化处理。为此, 研究结果存在一定的误差, 当然, 没有融冰也是其中的原因之一。因此, 需要进一步讨论和展开对南极以及亚南极地区有关 DMS flux 及其影响因素的深入研究。

致谢 感谢为本次研究提供数据的网站和系统项目: 提供叶绿素和云盖数据的 MODIS 网 (<http://gdata1.sci.gsfc.nasa.gov/>); 提供风速和海表温度数据

的遥感系统(<http://www.remss.com/>); 提供随年代变化混合层深度数据的的 Argo Mixed Layers 网(<http://mixedlayer.ucsd.edu/>); 提供 AMIP 在 $4\times\text{CO}_2$ 时的实验数据的 CMIP5 试验(<http://pcmdi9.llnl.gov/>)。感谢澳大利亚的 Albert J. Gabric 教授在校准数据和运行模型时提供的有效的建议和帮助。

参考文献

- 1 孙文静, 瞿波. 基于二甲基硫模型预测北极海表温度的研究进展[J]. 南通大学学报(自然科学版), 2015, 14(2): 26—31.
- 2 杨桂朋, 厉丞烜. 海洋生物对二甲基硫生产的控制作用研究[J]. 中国海洋大学学报:自然科学版, 2009, 39(3): 453—460.
- 3 CHARLSON R J, LOVELOCK J E, ANDREAE M.O, et al. Oceanic phytoplankton, atmospheric sulphur, cloud albedo and climate[J]. Nature, 1987, 326(6114): 655—661.
- 4 GABRIC A J, QU B, ROTSTAYN L D, et al. Global simulations of the impact on contemporary climate of a perturbation to the sea-to-air flux of dimethylsulfide[J]. Australian Meteorological & Oceanographic Journal, 2013, 63(3): 365—376.
- 5 效存德. 南极地区气候系统变化:过去、现在和将来[J]. 气候变化研究进展, 2008, 4(1): 1—7.
- 6 GABRIC A J, CROPP R, HIRST T, et al. The sensitivity of dimethyl sulfide production to simulated climate change in the Eastern Antarctic Southern Ocean[J]. Tellus Series B-chemical & Physical Meteorology, 2003, 55(5): 966—981.
- 7 KETTLE A J, ANDREAE M O. Flux of dimethylsulphide from the oceans: a comparison of updated data sets and flux models[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres. 2000, 105(D22): 26793—26808.
- 8 KORHONEN H, CARSLAW K S, SPRACKLEN D V, et al. Influence of oceanic dimethyl sulfide emissions on cloud condensation nuclei concentrations and seasonality over the remote southern hemisphere oceans: A global model study[J]. Journal of Geophysical Research, 2008, 113(113): 99—119.
- 9 QU B, GABRIC A J, ZENG M, et al. Dimethylsulfide model calibration in the Barents Sea using a genetic algorithm and neural network[J]. Environmental Chemistry, 2015, 13.
- 10 QU B, GABRIC A J, ZENG M, et al. Dimethylsulfide model calibration and parametric sensitivity analysis for the Greenland Sea[J]. Polar Science, 2017, 13: 13—22.
- 11 GABRIC A J, MURRAY N, STONE L, et al. Modelling the production of dimethylsulfide during a phytoplankton bloom[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1993, 98(C12): 22805—22816.
- 12 GABRIC A J, MATRAI P A, VERNET M. Modelling the production and cycling of dimethylsulphide during the vernal bloom in the Barents Sea[J]. Tellus Series B-chemical & Physical Meteorology, 1999, 51(5): 919—937.
- 13 GABRIC A J, QU B, MATRAI P, et al. The simulated response of dimethylsulfide production in the Arctic Ocean to global warming[J]. Tellus Series B-chemical & Physical Meteorology, 2005, 57: 391—403.
- 14 GABRIC A J. A Biogeochemical Modelling Analysis of the Potential For Marine Ecosystems to Regulate Climate By the Production of Dimethylsulphide[J]. American Physical Education Review, 2003, 43(3): 506—514.
- 15 ERICKSON D J, GHAN S J, PENNER J E. Global ocean-to-atmosphere dimethyl sulfide flux[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1990, 95(D6): 7543—7552.
- 16 杨洋. 热带印度洋海表温度日变化的特征与控制过程研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012: 5—7.
- 17 WANG C, WEISBERG R H, YANG H. Effects of the Wind Speed-Evaporation-SST Feedback on the El Niño-Southern Oscillation[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1999, 56(10): 1391—1403.
- 18 张双益. 浅积云中微物理特性的垂直分布及其对辐射强迫的影响[D]. 北京: 北京大学, 2010: 2—3.
- 19 QUAAS J, STEVENS B, STIER P, et al. Interpreting the cloud cover – aerosol optical depth relationship found in satellite data using a general circulation model[J]. Atmospheric Chemistry & Physics, 2010, 10(13): 6129—6135.
- 20 孙振宇, 刘琳, 于卫东. 基于 Argo 浮标的热带印度洋混合层深度季节变化研究[J]. 海洋科学进展, 2007, 25(3): 280—288.
- 21 刘辉, 江丽芳, 齐义泉, 等. 南沙群岛海域混合层深度季节变化特征[J]. 海洋科学进展, 2007, 25(3): 268—279.
- 22 安玉柱, 张韧, 王辉赞, 等. 全球大洋混合层深度的计算及其时空变化特征分析[J]. 地球物理学报, 2012, 55(7): 2249—2258.
- 23 SIMÓ R, PEDRÓSALIÓ C. Role of vertical mixing in controlling the oceanic production of dimethyl sulphide[J]. Nature, 1999,

- 402(6760): 396—399.
- 24 GABRIC A J, WHETTON P H, CROPP R. Dimethylsulphide production in the subantarctic southern ocean under enhanced greenhouse conditions[J]. *Tellus Series B-chemical & Physical Meteorology*, 2001, 53(3): 273—287.
- 25 QU B, GABRIC A J. Using genetic algorithms to calibrate a dimethylsulphide production model in the Arctic Ocean[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2011, 28(1): 573—582.
- 26 MARGALEF R. Life-forms of phytoplankton as survival alternatives in an unstable environment[J]. *Oceanol. Acta*, 1978, 1(4): 493—509.
- 27 GABRIC A J, SIMÓ R, CROPP R A, et al. Correction to “Modeling estimates of the global emission of dimethylsulphide under enhanced greenhouse conditions”[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2004, 18(2): 293—317.
- 28 FITCH D T, MOORE J K. Wind speed influence on phytoplankton bloom dynamics in the Southern Ocean marginal ice zone[J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 2007, 112(C8): 271—289.
- 29 CROPP R A, JOHN N, GABRIC A J, et al. Modeling dimethylsulphide production in the upper ocean[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2004, 18(3): 101—111.
- 30 COSME E, HOURDIN F, GENTHON C, et al. Origin of dimethylsulphide, non-sea-salt sulfate, and methanesulfonic acid in eastern Antarctica[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2005, 110(D3): 373—384.

DISTRIBUTION AND PREDICTION OF DIMETHYL SULFUR SEA-AIR FLUX IN SOUTH AUSTRALIA

Jiang Limei¹, Qu Bo²

(¹Nantong Chong Chuan School, Nantong 226000, China;

²School of Science, Nantong University, Nantong 226019, China)

Abstract

The sea-to-air flux of marine biological dimethylsulphide (DMS) can have an effect on cloud condensation and regional solar radiation, hence reducing the global surface temperature. Meanwhile, the DMS flux influence on climate cooling is more obvious because of a large quantity of melting ice in the polar region. This paper studied the distributions and annual variations of wind speed (WIND), cloud cover (CLOUD), sea surface temperatures (SST), chlorophyll (CHL), and mixed layer depth (MLD) in the Subantarctic nearly ice-free region (South Australia) (40°S—60°S, 110°E—140°E) for the years 2012—2014. A genetic algorithm technique was used to calibrate the main parameters in the DMS model. Simulation and analysis of the sea-air flux was also conducted. Finally, we used the CMIP5 (5th Coupled Model Intercomparison Project) to predict changes in the DMS flux for 4×CO₂ (year 2100), compared with 1×CO₂ (the contemporary case for the years 2012—2014). The results show that the increased rates of 4×CO₂ for SST, CLOUD, and WIND were 0.9, 5.6, and 12.3%, respectively. However, the MLD reduced rate was 41.0% and the increased rate of transfer velocity (k_w) was 58.8%. Because of the distinction of the melting ice, the DMS flux increased by only 9.4%. Therefore, the increased rate of the DMS flux is far less than the Polar Regions. The research results show that DMS has less effect on the greenhouse conditions in the Subantarctic nearly ice-free region (South Australia).

Key words Subantarctic, Dimethylsulphide (DMS), DMS sea-air flux, genetic algorithms, Chlorophyll (CHL)