



## 极地海洋环境评价理论与方法初探

王文娟<sup>1,2</sup> 宋巍<sup>1</sup> 郑小罗<sup>1</sup> 黄冬梅<sup>1</sup> 朱建钢<sup>3</sup> 魏新宇<sup>1</sup>

<sup>1</sup>上海海洋大学信息学院, 上海 201306;

<sup>2</sup>农业部渔业信息重点实验室, 上海 201306;

<sup>3</sup>中国极地研究中心, 上海 200136)

**摘要** 极地海洋环境评价对于极地海洋生态系统保护尤为重要。由于对极地极端恶劣环境的监测能力不足, 缺乏长期连续监测数据, 极地海洋环境评价变得异常困难。针对目前极地海洋环境评价目标和评价因子均缺乏的情况, 在已有文献基础上, 本文提出了海水表层叶绿素浓度、海冰覆盖范围、海水表层温度和盐度四个极地海洋环境决定因子, 分析了海冰覆盖范围与月份之间高度拟合的三次多项式分布关系, 并在此基础上构建了极地海洋环境评价模型, 最后提出了一种验证该模型的方法。基于第 30、31、32 次南极科考获取的海水表层叶绿素浓度、温度、盐度数据以及美国国家冰雪数据中心提供的对应时间内的海冰覆盖范围数据对提出的评价模型和方法进行了验证, 实验结果表明: 该评价模型及其验证方法具有有效性, 根据评价结果能判定某个时间段内极地海洋环境相对于基准时间的变化趋势。

**关键词** 极地海洋 环境评价 评价模型

doi: 10.13679/j.jdyj.20170045

### 0 引言

海洋环境是一个多输入多输出的动态复杂系统, 具有不确定性和模糊性<sup>[1]</sup>。海洋环境评价是指通过测量海洋各水质指标对海水的水质等级进行综合评判, 从而确定受评海域是否被污染, 为海洋生物保护以及海域景观管理与决策提供依据<sup>[2]</sup>。目前, 国内外关于水体评价研究的方法很多, 包括早期的单因子指数法<sup>[3-4]</sup>、综合指数法<sup>[5-6]</sup>、分级评价法<sup>[7-9]</sup>等, 以及近期的模糊理论<sup>[9-11]</sup>、灰色系统理论<sup>[12-13]</sup>、投影寻踪模型<sup>[14]</sup>、神经网络<sup>[2]</sup>、逐步判别分析<sup>[15]</sup>等。然而, 海洋水体物质成分众多, 海洋水质评价需要多年积累的连续水质监测数据, 因此这类海洋环境质量评价研究多集中在

数据相对比较容易获取的近岸海域。鉴于极地环境恶劣, 常年被冰川和积雪覆盖, 除了夏季以外近岸多以海冰的形式存在, 极地海洋环境的评价尤为困难。随着人类对极地探索的加深以及全球环境变化对极地的影响, 极地海洋环境也发生着重大变化, 进一步研究极地海洋环境的质量对于探索和保护极地海洋生态系统至关重要。

目前极地海洋环境方面的研究十分有限, 主要关注于极地海洋生物成分构成和习性研究<sup>[16-20]</sup>、海冰变化研究<sup>[21-24]</sup>, 以及大气及周边环境对极地海洋的影响研究等方面<sup>[21-22, 25-27]</sup>。同时, 相关学者和国际组织在极地综合环境测评, 特别是人文环境影响方面做出了一些探索<sup>[28-30]</sup>。1998 年生效的《关于环境保护的南极条约议定书》规定了各国开展诸如人类活动强度与规模、环境影响、环

[收稿日期] 2017 年 11 月收到来稿, 2018 年 1 月收到修改稿

[基金项目] 海洋公益性行业科研专项(201405031-05)、上海市高校特聘教授(东方学者)项目(TP201638)和上海市科委地方院校能力建设项(17050501900)资助

[作者简介] 王文娟, 女, 1983 年生。博士, 讲师, 主要从事海洋环境评估研究。E-mail: wangwj@shou.edu.cn

[通信作者] 宋巍, E-mail: wsong@shou.edu.cn

境质量现状与南极环境背景值调查等南极环境科学研究的标准<sup>[28]</sup>，旨在通过有效措施来规范人类的南极活动和保护南极环境及其依附的相关生态系统。但是，基于综合指标的极地海洋环境评价研究目前还处于空白领域。

是否可以借鉴近岸海洋环境评价方法来评价极地海洋环境呢？答案是否定的。极地海洋环境与近岸海洋环境相比，差异较大。首先，海水特性及生态系统不同。极地极端天气下海冰是高纬度海洋中海水的一种重要存在形式，少数情况可形成固定冰；微微型(粒径 $<2\ \mu\text{m}$ , autotrophic pico-flagellate, APF)和微型浮游植物(粒径 $2\text{—}20\ \mu\text{m}$ , autotrophic nano-flagellate, ANF)是极地海洋水体中生物量和生产量的重要贡献者<sup>[16,31-32]</sup>。其次，近岸海洋环境评价具有非常明确的评价因子和评价目标。比如在我国 1998 年实施的海水水质标准 GB3097-1997 中，按照海域的不同使用功能和保护目标，明确将海水水质分为四类，并规定了四类水质对应的各种环境评价因子的数值范围，为近岸海洋环境评价提供了非常明确的评价目标。目前国内很多海洋环境评价模型的评价因子均是这个海水水质标准的子集<sup>[1-2,15]</sup>。然而，由于极地海洋研究的局限性，还没有任何一个国家或组织制定过类似的极地海洋水质标准，这大大增加了极地海洋环境评价的难度。要解决这个问题，既要想办法确定极地海洋环境的评价因子，也要想办法构建评价目标。最后，由于人类活动多集中在近海岸，近岸海洋数据的监测和获取相对容易，而极地海洋数据获取，尤其是长时间连续监测数据的获取在世界范围内都是一个难题。

本文的目的是初步探索极地海洋环境评价的理论与方法，包括探究极地海洋环境的评价目标和关键影响因子，构建初步的评价模型，并提出极地海洋环境评价模型的验证方法等，其研究结果将进一步推动极地海洋环境研究的发展。

## 1 方法

### 1.1 极地海洋环境评价的关键指标

如上文所述，目前尚未有通用的极地海洋环境评价因子和评价目标。本文通过对现有文献进行深度分析，在极地海洋环境评价目标不清晰的

情况下，将海洋生态系统的平衡性作为环境评价的重要目标。因此，在探索评价因子时，聚焦与极地海洋生态系统平衡性有强相关性的因素。同时，考虑到极地环境的特殊性，所选择的环境评价因子必须是在极地考察站或在极地考察活动中容易测量和获取的数据<sup>[28]</sup>。

#### 1.1.1 海水表层叶绿素浓度

海水中叶绿素的含量能够代表海洋中浮游植物的现存量，因此叶绿素的含量被认为是海洋生态系统的重要影响因素之一<sup>[33]</sup>。很多极地海洋研究学者将海水表层叶绿素浓度作为极地海洋生态系统是否平衡的重要指标之一，并试图通过分析其浓度范围来确定极地海洋浮游生物的含量及其变化趋势<sup>[16,20,34-41]</sup>。

李慧蓉等<sup>[33]</sup>利用 2014 年夏季中国第 6 次北极科考获得的连续海水表层叶绿素浓度、温度和盐度数据，测试出白令海至楚科奇海海域叶绿素浓度平均值为  $1.166\ \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ，变化范围为  $0.06\text{—}8.283\ \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ，并用海水中叶绿素含量代表浮游植物的现存量，分析了浮游植物生长状况与海水表层温度和盐度的相关性。罗光富等<sup>[34]</sup>用叶绿素浓度代表浮游植物的生物量，并基于该理论使用 2010—2011 年夏季南极长城湾监测的数据验证了海水表层叶绿素浓度与水体流速之间存在显著的负相关。张芳等<sup>[16]</sup>利用 2008 年中国第三次北极科学考察的机会，分析了夏季楚科奇海微微型、微型浮游植物和细菌丰度的分布特征，并通过实验数据分析得出三种生物均与海水中叶绿素浓度成显著性相关，叶绿素是微微型浮游植物的主要组成成分和初级生产力的主要贡献者。崔世开等<sup>[20]</sup>在测试北极黄河站附近的王湾海域浮游植物对光照和盐度变化的适应性研究中，也将表层叶绿素浓度作为浮游植物群落生长速率的量化标准。此外，Boyce 等<sup>[38]</sup>通过历史数据实验证明了叶绿素浓度对海洋微生物生态环境具有重要指导意义，Meiners 等<sup>[39]</sup>也基于历史数据分析了南大洋叶绿素含量变化，据此来反映南大洋海冰生态环境的现状，Ryan 等<sup>[40]</sup>研究在海冰融化过程中叶绿素的变化，进而反映海冰生态环境的变化，Moore 等<sup>[41]</sup>通过卫星数据对南大洋海水表层叶绿素的含量进行了连续监测，获取了南大洋海水表层叶绿素含量的季节特性和空间特性，并以此反映南

极海洋生态环境的变化特性。综上所述,将海水表层叶绿素浓度作为拟构建的极地海洋环境评价模型的决定因子是具有理论依据的,并且通过荧光仪,叶绿素浓度是比较容易连续监测和获取的数据。

### 1.1.2 海冰覆盖范围

随着全球气候变暖,极地环境的研究逐渐受到重视,其中大气环境对极地海冰覆盖范围的影响是一个持续研究热点<sup>[21-22,25-27]</sup>。近年来,国内外学者开始关注海冰覆盖范围的变化对极地海洋生态环境的影响。

王桂忠等<sup>[23]</sup>通过深度分析国内外文献总结出,北冰洋海冰覆盖面积从20世纪70年代开始迅速下降、冰层变薄、水温升高、淡水输入增加、臭氧层和重金属等污染加剧,正威胁着现有与海冰关系密切的生态系统,并预测与海冰相关的食物链将在部分海域消失并被较低纬度的海洋生物物种所取代,而北极熊和海象等大型海洋动物的生存也面临极大挑战。何剑锋等<sup>[19]</sup>系统分析了北冰洋海域微食物环,对其主要类群的基本生态特征及各类种群间的相互关系做了分析,同时指出近年来海冰覆盖面积迅速减少会对微食物环的结构和功能产生重大影响,进而影响整个极地海洋生态系统。Legendre等<sup>[17]</sup>认为海冰覆盖范围与生态系统密切相关,海冰支持了一个极富生产力的海冰生物群落。Melnikov等<sup>[18]</sup>通过实验分析了海冰覆盖范围的变化与海冰生态系统之间的关联性。Vincent<sup>[24]</sup>通过历史观测数据验证了海冰覆盖范围变化对极地海洋微生物生态系统具有一定的破坏力。因此,将海冰覆盖范围作为极地海洋环境评估模型的一个决定因子具备充足的理论依据;同时,连续的海冰覆盖范围数据可以通过卫星获取并免费下载使用,将海冰覆盖范围作为评估模型的一个决定因子具备可行性。

此外,陈静和陆志波<sup>[22]</sup>从美国国家冰雪数据中心(National Snow and Ice Data Center)获取了南大洋区域1978年11月—2013年12月逐月海冰覆盖范围的卫星数据,并在此基础上分析南大洋海冰范围的变化趋势,其研究结果显示南大洋海冰覆盖范围整体呈现小幅度增加趋势,而且南大洋海冰覆盖范围呈现显著的季节性,不同月份海冰范围差异很大。南大洋海冰范围最小值出现在

2月份,多年平均值为 $3.13 \times 10^6 \text{ km}^2$ ,最大值出现在9月份,多年平均值为 $18.9 \times 10^6 \text{ km}^2$ <sup>[22,42]</sup>,2月到9月之间随着气温降低,海冰覆盖范围由小到大逐渐变化,9月到次年2月之间,随着气温升高,海冰覆盖范围由大到小逐渐变化。沈校熠等<sup>[43]</sup>通过对2002—2011年南极海冰时空遥感数据进行深度分析,揭示出了相似的规律,即海冰覆盖范围夏季2月份最低,最低值为 $2.03 \times 10^6 \text{ km}^2$ (2006年2月21日),冬季9月份最高,历年最大值为 $19.8 \times 10^6 \text{ km}^2$ (2005年9月26日),虽然每年的海冰覆盖范围变化幅度不一,但南极各海区海冰范围季节变化特征几近相同。因此,在拟构建的极地海洋环境评价模型中,需要将月份与海冰覆盖范围之间的函数关系包含在内。

### 1.1.3 海水表层温度和盐度

海水表层温度和盐度是极地海洋环境决定因子中比较容易获取的数据,也是极地海洋研究的热点之一。海水表层温度和盐度不仅对极地海洋生态系统有直接影响,还与影响极地海洋生态系统的其他两大要素——海水表层叶绿素浓度和海冰覆盖范围有强相关性<sup>[16,20,22-24,33,40,43-44]</sup>。陈静和陆志波<sup>[22]</sup>发现表层温度对海冰覆盖范围有直接影响,夏季温度高时海冰覆盖范围小,冬季温度低时海冰覆盖范围大,温度的变化对于极地海洋生物的种类有重要影响。王桂忠等<sup>[23]</sup>的研究表明表层温度升高会造成海冰覆盖范围减小,进而直接影响极地海洋生态系统。沈校熠等<sup>[43]</sup>通过分析南极海冰近10年遥感时空数据揭示出2002年7月—2011年6月逐月海冰覆盖范围与逐月气温存在着明显的负相关关系。Vincent<sup>[24]</sup>的研究也表明温度的变化可能会造成极地海洋微生物生态系统的种群发生变动。在极地海洋生物的适应性相关研究领域,学者普遍将海水表层叶绿素浓度、温度和盐度作为重要考量指标,其中文献<sup>[16,20,33,40,45-47]</sup>等均揭示出表层温度和盐度对于极地海洋生物生态环境有晴雨表的作用,一旦温度过高或盐度过低均会对原来的生态系统造成破坏,造成生物种群的变化。因为尚缺少可信的数据,表层温度、盐度、叶绿素浓度和海冰覆盖范围之间关联很难进行量化,因此拟构建的极地海洋环境评价模型将海水表层温度和盐度,同表层叶绿素浓度和海冰覆盖范围一起作为环境决定

因子。

### 1.2 评价模型的构建

目前极地海洋生态系统的平衡性没有既定的标准,本文在分析极地海洋生态环境关键影响指标的基础之上,构建了极地海洋环境评价模型 PEAM (Polar Environmental Assessment Model),模型公式如下:

$$PEAM = K_1\alpha + K_2\beta(t) + K_3T + K_4S \quad (1)$$

其中,海水表层叶绿素浓度  $\alpha$ ,海冰覆盖范围  $\beta$ ,海水表层温度  $T$ 和海水表层盐度  $S$ 这四个极地海洋环境影响因子的权重分别为  $K_1, K_2, K_3, K_4$ 。由于海水表层温度  $T$ 和盐度  $S$ 的综合影响在其他两个因子中得到反映,因此这里不考虑将其作为独立参变量。为了反映海冰覆盖范围随时间的变化, $\beta(t)$ 定义为海冰覆盖范围与月份  $t$ 之间的函数依赖关系,需进一步根据实验数据进行推导。

### 1.3 评价模型的验证方法

由于缺乏国际标准和长期数据,对公式(1)中的极地海洋环境评价模型的验证变得异常困难。最主要的问题是如何确定 PEAM 的目标基准(或评估值域)。因此,本文拟提出一种对上述 PEAM 假设模型进行验证的理论方法,其基本思路为:以某一相对基准来评价环境变化趋势。具体流程如下:

1. 确定极地海洋环境评价目标的基准。因为没有通用的评级标准和长期的历史数据,本项目拟采用某一个时间段内的环境评价因子数据作为对比基准,例如,取 2015 年 3 月的南极周边海域表层叶绿素浓度、海冰覆盖范围、表层温度和盐度的数据作为基准数据,令假设模型 PEAM 的结果为 1;

2. 利用观测到的四个环境因子的数据,经过多元线性回归训练,计算出假设模型中的决定因子的参数  $K_1, K_2, K_3, K_4$ ;

3. 选取基准年之后的年份的同一个时间段(比如 2017 年 3 月)观测到的四个环境因子数据,将其代入假设模型计算模型结果  $a$  ( $a \geq 1$  或  $a \leq 1$ );

4. 选取基准年之前的年份的同一个时间段(比如 2013 年 3 月)观测到的四个环境因子数据,将其代入假设模型计算模型结果  $a$  ( $b \geq 1$  或  $b \leq 1$ );

5. 根据步骤 3 和步骤 4 的计算结果确定模型计算结果数值大小与极地海洋环境变化趋势之间

的关系。

根据步骤 3 和步骤 4 计算出来的  $a$  和  $b$  的值大于 1 或小于 1 的情况,代入基准年份之前或之后的某个时间点的四个环境因子数据到假设模型 PEAM 并计算其结果,根据模型计算值跟 1 的比较情况,可以推断出所验证的时间点极地海洋环境的变化趋势。如果步骤 3 和步骤 4 计算结果为  $a < 1$ ,同时  $b > 1$ ,代入新的验证数据之后模型计算结果为小于 1 的数值,则说明验证的时间点极地海洋环境有恶化的趋势,反之,说明环境有改善趋势;如果步骤 3 和步骤 4 计算结果为  $a > 1$ ,同时  $b < 1$ ,代入新的验证数据之后模型计算结果为小于 1 的数值,则说明验证的时间点极地海洋环境有改善的趋势,反之,说明环境有恶化趋势。

假设选取了任意一个时间点的四个环境因子的数据,代入假设模型 PEAM 计算出的结果为  $x$ ,即

$$K_1\alpha + K_2\beta(t) + K_3T + K_4S = x \quad (2)$$

不管步骤 3 和步骤 4 计算结果为  $a < 1$  同时  $b > 1$ ,还是  $a > 1$  同时  $b < 1$ ,极地海洋环境恶化或改善的程度均为  $|x-1|/1 \times 100\%$ 。

以上是针对目前极地海洋环境评价因子和评价目标不确定情况提出的一种验证极地海洋环境评价模型 PEAM 的理论方法,可以计算出极地海洋环境变化的趋势和程度,为保护极地海洋生态系统提供量化依据。

## 2 实验数据与结果分析

### 2.1 数据介绍

为检验以上极地海洋环境评价理论模型和验证方法,本文进行了相关实验。我们从中国极地研究中心获取了第 30、31、32 次南极科考时的极地海洋环境实测数据,包括表层温度、盐度、叶绿素浓度等指标。这三次南极科考分别发生于 2013、2014、2015 年的相近月份,从当年的 11 月末到次年的 3 月上旬,符合本实验对观测数据时间方面的要求。三次科考数据测量的是南极普里兹湾海域海水表层水文观测数据,其中温度( $T$ )和盐度( $S$ )数据由海鸟 SBE 911 plus CTD 直接获得,叶绿素浓度( $\alpha$ )用唐纳荧光仪进行测定。本文南极站点测量的普里兹湾区域纬度范围为  $64^\circ\text{S}$ —

70°S, 经度范围为 68°E—78°E。此外, 我们从美国国家冰雪数据中心下载了对应时间和空间范围内南极的海冰覆盖范围数据<sup>[48]</sup>。获取的具体实验数据情况如表 1 所示。因为海冰覆盖范围数据的最

小单位是天, 而表层叶绿素浓度、温度、盐度的测量数据可以精确到分秒, 所以, 拟合度完好的四个极地海洋环境决定因子数据与海冰覆盖范围数据记录数目保持一致, 以天为单位。

表 1 数据记录情况  
Table 1. Introduction of the data set

考察航次	起始时间	结束时间	表层叶绿素浓度数据记录/条	表层温度数据记录/条	表层盐度数据记录/条	对应时间内海冰覆盖范围数据记录/条
30	2013-11-30	2014-03-02	27	27	27	8
31	2014-11-29	2015-03-06	545	545	545	32
32	2015-12-01	2016-03-10	369	369	369	21

### 2.2 海冰覆盖范围与月份之间的函数依赖关系

为了研究海冰覆盖范围与月份之间的依赖关系, 我们从美国国家冰雪数据中心还下载了 2008—2017 年 10 年间的南极海冰覆盖范围逐月数据。根据 2008—2017 年南极海冰范围统计分析(图 1), 最小值出现在 2 月份, 10 年平均海冰范围分别为  $3.26 \times 10^6 \text{ km}^2$ , 最大值出现在 9 月份, 平均值为  $18.73 \times 10^6 \text{ km}^2$ , 这与已有文献<sup>[22,43]</sup>的结论基本一致。我们选择三次多项式拟合数据曲线进行训练, 因为三次多项式是一种光滑的样条曲线, 可以用来逐段拟合数据, 使得拟合曲线是光滑的。从图 1 的实验结果来看, 海冰覆盖范围与月份之间的依赖关系与三次多项式分布曲线拟合度非常高。

$$SA = 7.43 - 3.95t + 1.28t^2 - 0.078t^3 \quad (3)$$

$$R^2=0.974$$

要消除月份带来的影响, 在计算 PEAM 时需要对其按月份的影响进行归一化, 即将某一测量值 SA 除以(3), 即

$$PEAM = K_1\alpha + K_2\beta / SA(t) + K_3T + K_4S \quad (4)$$

### 2.3 极地海洋环境评价模型与方法的验证

根据 1.3 节提出的评价模型验证方法, 我们首先来确定  $K_1, K_2, K_3, K_4$  这四个参数。以第 31 次南极科考期间 2 月的数据为基准(该月份观测到的连续数据最多), 将 2015 年 2 月 2 日—2015 年 2 月 28 日所收集到的 24 组四个环境决定因子数据对应的 PEAM 值设置为 1, 经多元回归, 得到:

$$K_1=0.004, K_2=0.117, K_3=-0.005, K_4=0.027$$

四个参数确定后, 我们需要选择基准年之后和之前的同一时间段观测到的四个环境因子数据进行比较。在此, 我们进一步计算 2016 年 2 月(第 32 次科考)和 2014 年 2 月(第 30 次科考)的 PEAM 均值, 计算结果如表 2 所示。2016 年 2 月计算出的 PEAM 均值  $a$  为 0.955, 2014 年 2 月计算出的 PEAM 均值  $b$  为 1.01, 模型计算结果符合  $a < 1$ , 同时  $b > 1$ 。

表 2 基准年前后年份同一月份的 PEAM 均值

Table 2. The PEAM mean of the same month of the year before and after the base year

考察航次	观测时间	PEAM 均值
32	2016年2月	0.955
30	2014年2月	1.01

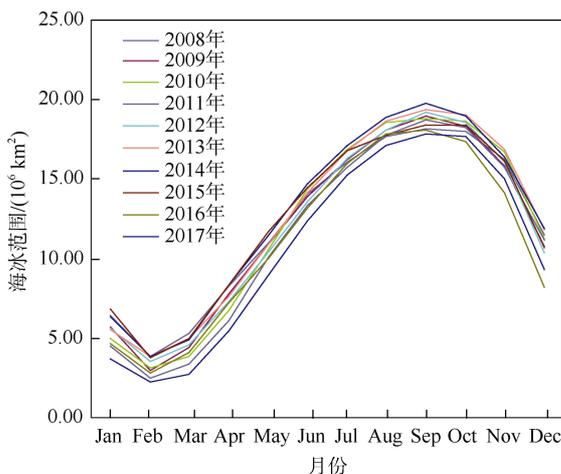


图 1 2008—2017 年南极海冰范围与月份之间的关系  
Fig.1. The relationship between the Antarctic sea ice extent and the month of the year 2008—2017

根据计算, 我们得到下面的海冰覆盖范围公式(3), 精度以  $R^2$  测量达到 0.974。

最后, 我们将观测数据相对较多的 2016 年 3 月(第 32 次科考)的 10 组数据代入假设模型 PEAM

并计算其结果  $x$  的值为 0.96, 即说明相对于基准 2015 年 2 月, 2016 年 3 月的极地海洋环境有恶化的趋势, 其环境恶化的程度为 4%。

### 3 结论

本文初步探索了极地海洋环境评价模型与方法, 并基于第 30、31、32 次南极科考获取的海水表层叶绿素浓度、温度、盐度数据以及美国国家冰雪数据中心提供的对应时间和空间范围内的海冰覆盖范围数据, 对提出的评价模型和方法进行了验证。

1. 将海洋生态系统的平衡性作为极地海洋环境评估的重要目标, 从与极地海洋生态系统平衡性具有强相关性和容易测量获取的两个维度, 选取了海水表层叶绿素浓度、海冰覆盖范围、海水表层温度、海水表层盐度四个环境评价决定因子。

2. 已有文献表明海冰覆盖范围与月份之间存在强关联, 通过对美国国家冰雪数据中心提供的 2008—2017 年逐月海冰覆盖范围数据统计分析, 发现海冰覆盖范围与月份之间存在着高度拟合的三次多项式分布关系。

3. 在分析极地海洋生态环境关键影响指标的基础之上, 构建了极地海洋环境评价模型 PEAM, 并提出了该评价模型的验证方法, 即以某一相对基准来评价环境变化趋势。实验结果表明, 该评价模型及其验证方法具有有效性, 根据评价结果能判定某个时间段内极地海洋环境相对于基准时间的变化趋势。

4. 本文是对极地海洋环境评价理论和方法的初步探索, 实验数据量比较小, 而且南极和北极海域的情况也存在差异, 需要收集更多的数据进行对比分析。此外, 四个环境决定因子之间的内部联系也尚未做深入探究, 研究结果存在一定的局限性。

### 参考文献

- 1 宋江敏, 刘加伶. 海洋环境质量评价的灰色聚类模型及应用[J]. 重庆工业管理学院学报, 1997, 11(3): 47—51.
- 2 周蓉蓉, 孙英兰. 遗传神经网络在海水水质综合评价的应用[J]. 海洋湖沼通报, 2009, (3): 167—173.
- 3 张秋丰, 张建乐, 丁家坤. 洋河口海域海洋环境质量现状评价[J]. 海洋环境科学, 1997, 16(4): 38—42.
- 4 宋伦, 周遵春, 王年斌, 等. 辽宁省近岸海洋环境质量状况与趋势评价[J]. 水产科学, 2007, 26(11): 613—618.
- 5 徐鸿楷. 半集均方差水质评价模式[J]. 环境科学, 1985, 6(4): 55—59.
- 6 WALSKI T M, PARKER F L. Consumers water quality index[J]. Journal of the Environmental Engineering Division, 1974, 100(3): 593—601.
- 7 申葆诚, 徐国义. 希耳伯空间(Hilbert Space)理论在环境污染综合评价中的应用[J]. 环境科学, 1981, 2(4): 57—60, 79.
- 8 SHANNON E E, BROEZONIK P L. Eutrophication analysis: a multivariate approach[J]. Journal of Sanitary Engineering Division, 1972, 98(1): 37—57.
- 9 柯丽娜, 王权明, 周惠成. 多目标可变模糊评价模型在海水水质评价中的应用[J]. 海洋通报, 2012, 31(4): 475—480.
- 10 张静, 孙省利. 海水环境质量模糊-灰色关联评价及应用[J]. 广东海洋大学学报, 2011, 31(6): 68—72.
- 11 曹宇峰, 林春梅, 孙霞. 模糊数学法在海洋水质评价中的应用[J]. 海洋技术, 2011, 30(2): 118—122.
- 12 付会, 孙英兰, 孙磊, 等. 灰色关联分析法在海洋环境质量评价中的应用[J]. 海洋湖沼通报, 2007, (3): 127—131.
- 13 秦昌波, 郑丙辉, 秦延文, 等. 渤海湾天津段海岸带水环境质量灰色关联度评价[J]. 环境科学研究, 2006, 19(6): 94—99.
- 14 李彦苍, 周书敬. 基于改进投影寻踪的海洋生态环境综合评价[J]. 生态学报, 2009, 29(10): 5736—5740.
- 15 张莹, 付东洋, 潘德炉, 等. 逐步判别分析法在海洋水质评价中的应用[J]. 海洋学报, 2013, 35(6): 204—209.
- 16 张芳, 何剑锋, 郭超颖, 等. 夏季北冰洋楚科奇海微微型、微型浮游植物和细菌的丰度分布特征及其与水团的关系[J]. 极地研究, 2012, 24(3): 238—246.
- 17 LEGENDRE L, ACKLEY S F, DIECKMANN G, et al. Ecology of sea ice biota-2. Global significance[J]. Polar Biology, 1992, 12: 429—444.
- 18 MELNIKOVA I A, KOLOSOVA E, WELCH H E, et al. Sea ice biological communities and nutrient dynamics in the Canada Basin of the Arctic Ocean[J]. Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 2002, 49(9): 1623—1649.

- 19 何剑锋, 崔世开, 张芳, 等. 北冰洋海域微食物环研究进展[J]. 生态学报, 2011, 31(23): 7279—7286.
- 20 崔世开, 何剑锋, 何培民, 等. 北极王湾海域浮游植物对光照和盐度变化的适应性研究[J]. 极地研究, 2014, 26(2): 230—237.
- 21 张璐, 张占海, 李群, 等. 近30年北极海冰异常变化趋势[J]. 极地研究, 2009, 21(4): 344—352.
- 22 陈静, 陆志波. 1979—2013年南大洋海冰变化特征及与典型气候变化因子的相关性分析[J]. 极地研究, 2016, 28(4): 539—547.
- 23 王桂忠, 何剑锋, 蔡明红, 等. 北冰洋海冰和海水变异对海洋生态系统的潜在影响[J]. 极地研究, 2005, 17(3): 165—172.
- 24 VINCENT W F. Microbial ecosystem responses to rapid climate change in the Arctic[J]. The ISME Journal, 2010, 4(9): 1087—1090.
- 25 PARKINSON C L, CAVALIERI D J. Antarctic sea ice variability and trends, 1979—2010[J]. The Cryosphere, 2012, 6(4): 871—880.
- 26 TURNER J, HOSKING J S, BRACEGIRDLE T J, et al. Recent changes in Antarctic sea ice[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A, 2015, 373(2045): 20140163.
- 27 TURNER J, HOSKING J S, MARSHALL G J, et al. Antarctic sea ice increase consistent with intrinsic variability of the Amundsen Sea Low[J]. Climate Dynamics, 2016, 46(7—8): 2391—2402.
- 28 张洁, 凌晓良, 汪大立, 等. 探讨建立基于Web的中国南极环境评估系统[J]. 极地研究, 2006, 18(4): 273—281.
- 29 李金香, 李天杰. 南极长城站地区环境质量评估与采样管理信息系统的设计[J]. 极地研究, 1997, 9(4): 319—324.
- 30 李玉娇, 杨海真, 陆志波. 南极内陆科考站的环境影响评价及减缓措施[J]. 四川环境, 2013, 32(5): 43—48.
- 31 GARNEAU M E, VINCENT W F, ALONSO-SÁEZ L, et al. Prokaryotic community structure and heterotrophic production in a river-influenced coastal arctic ecosystem[J]. Aquatic Microbial Ecology, 2006, 42(1): 27—40.
- 32 SCHLOSS I R, NOZAI S, MAS S, et al. Picophytoplankton and nanophytoplankton abundance and distribution in the southeastern Beaufort Sea (Mackenzie Shelf and Amundsen Gulf) during Fall 2002[J]. Journal of Marine Systems, 2008, 74(3—4): 978—993.
- 33 李慧蓉, 陆志波, 王娟, 等. 东海至楚科奇海表层海水叶绿素a分布研究[J]. 环境科学与技术, 2016, 39(12): 80—86, 105.
- 34 罗光富, 何剑锋, 张芳, 等. 夏季南极长城湾海流变化特征及其对浮游植物生物量的影响[J]. 海洋学报, 2016, 38(10): 113—124.
- 35 李宝华. 南极长城站及邻近海域叶绿素a次表层极大值的研究[J]. 极地研究, 2004, 16(2): 127—134.
- 36 李宝华. 南极长城站码头及临近海域夏季叶绿素a含量及变化[J]. 极地研究, 2004, 16(4): 332—337.
- 37 俞建奎, 李瑞香, 黄凤鹏. 南极长城湾浮游植物生态的初步研究[J]. 极地研究, 1992, 4(4): 34—39.
- 38 BOYCE D G, DOWD M, LEWIS M R, et al. Estimating global chlorophyll changes over the past century[J]. Progress in Oceanography, 2014, 122(3): 163—173.
- 39 MEINERS K M, VANCOPPENOLLE M, THANASSEKOS S, et al. Chlorophyll *a* in Antarctic sea ice from historical ice core data[J]. Geophysical Research Letters, 2012, 39(21): L21602.
- 40 RYAN K G, TAY M L, MARTIN A, et al. Chlorophyll fluorescence imaging analysis of the responses of Antarctic bottom-ice algae to light and salinity during melting[J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2011, 399(2): 156—161.
- 41 MOORE J K, ABBOTT M R. Surface chlorophyll concentrations in relation to the Antarctic Polar Front: seasonal and spatial patterns from satellite observations[J]. Journal of Marine Systems, 2002, 37(1—3): 69—86.
- 42 SIMMONDS I. Comparing and contrasting the behaviour of Arctic and Antarctic sea ice over the 35 year period 1979—2013[J]. Annals of Glaciology, 2015, 56(69): 18—28.
- 43 沈校熠, 柯长青, 张杰. 2002—2011年南极海冰变化的遥感分析[J]. 极地研究, 2017, 29(1): 163—171.
- 44 陈际雨, 韩正兵, 扈传昱, 等. 南极普里兹湾营养盐分布特征及季节性消耗[J]. 极地研究, 2017, 29(3): 327—337.
- 45 张芳, 何剑锋, 林凌, 等. 2008年夏季白令海陆架区微小型浮游植物分布及环境相关性分析[J]. 海洋学报, 2011, 33(2): 134—145.
- 46 何剑锋, 张芳, 蔡明红, 等. 基于极地近岸海洋环境监测系统的南极长城湾生态环境变化初析[J]. 极地研究, 2011, 23(4): 269—274.
- 47 杨鹏, 何剑锋, 张芳, 等. 极地产甲烷菌研究进展[J]. 极地研究, 2016, 28(1): 145—151.
- 48 FETTERER F, KNOWLES K, MEIER W, et al. Sea Ice Index, Version 3[R]. Boulder, Colorado USA: NSIDC, 2017, doi: 10.7265/N5K072F8.

## PRELIMINARY STUDY ON POLAR MARINE ENVIRONMENTAL ASSESSMENT THEORY AND METHOD

Wang Wenjuan<sup>1,2</sup>, Song Wei<sup>1</sup>, Zheng Xiaoluo<sup>1</sup>, Huang Dongmei<sup>1</sup>, Zhu Jiangang<sup>3</sup>, Wei Xinyu<sup>1</sup>

<sup>1</sup>College of Information Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

<sup>2</sup>Key Laboratory of Fishery Information of Ministry of Agriculture, Shanghai 201306, China;

<sup>3</sup>Polar Research Institute of China, Shanghai 200136, China)

### Abstract

Marine environmental assessment is critical for marine ecosystem protection. Because of the harsh environment and lack of continuous monitoring data, it is extremely difficult to evaluate the polar marine environment. In view of the lack of assessment criteria specific for the polar marine environment, this study conducted a literature review and examined four characteristics of the polar marine environment: sea surface chlorophyll concentration, sea ice extent, sea surface temperature and salinity. A polar marine environmental assessment model is proposed, integrating the four characteristics as independent variables in a cubic polynomial function to describe the relationship between sea ice extent and month of the year. A validation method is presented and was used to test and verify the assessment model using sea surface chlorophyll concentration, temperature and salinity data collected on the 30th, 31st, and 32nd Chinese National Antarctic Research Expeditions and sea ice extent data downloaded from the National Snow and Ice Data Center of the United States. Results demonstrated the effectiveness of the assessment model and its validation method, and showed that the model can be used to determine the trend of polar marine environments relative to specified baselines.

**Key words** polar marine, environmental assessment, assessment model